

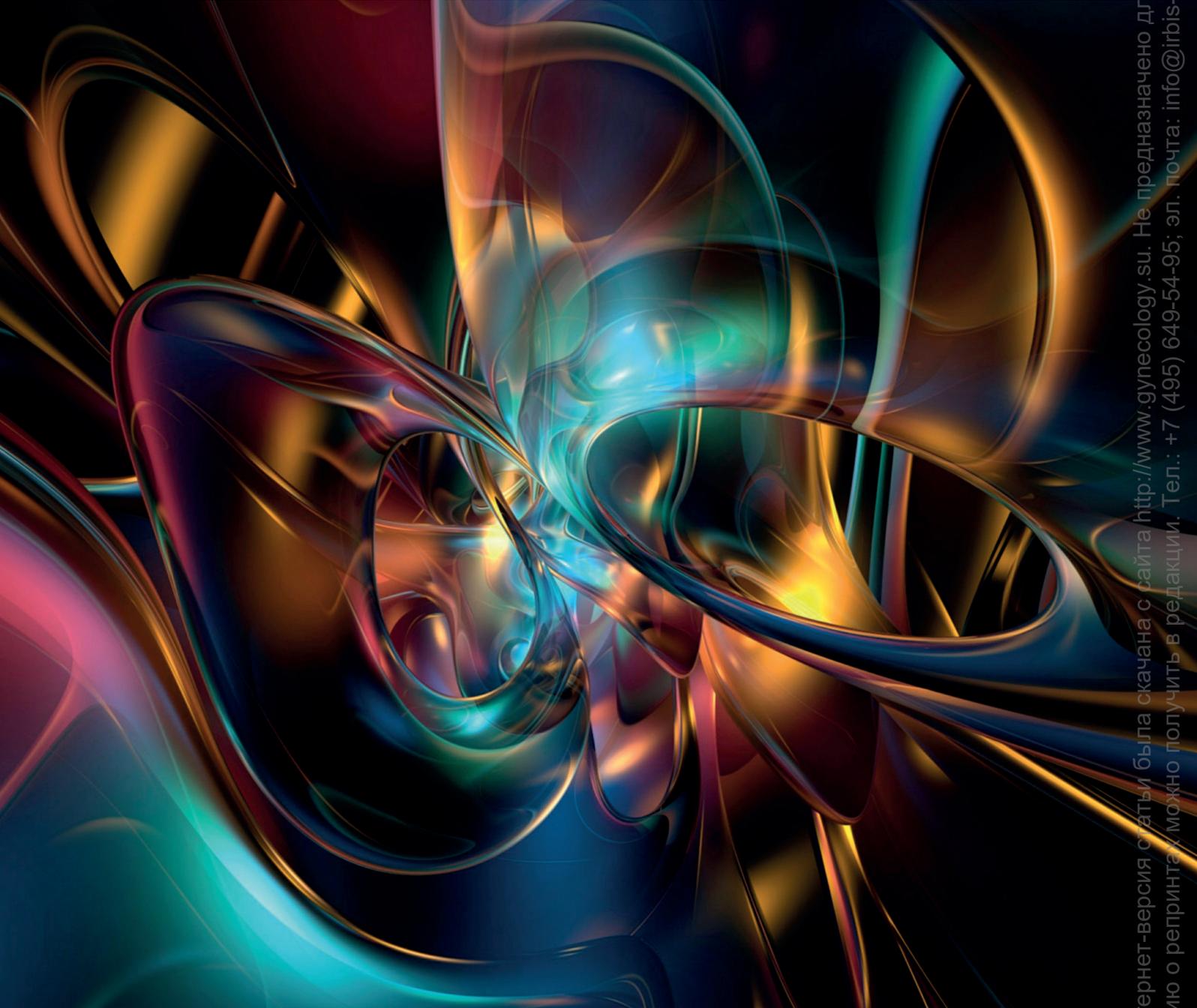
ISSN 2313-7347 (print)

ISSN 2500-3194 (online)

АКУШЕРСТВО ГИНЕКОЛОГИЯ РЕПРОДУКЦИЯ

Включен в перечень ведущих
рецензируемых журналов и изданий ВАК

2025 • ТОМ 19 • № 1



OBSTETRICS, GYNECOLOGY AND REPRODUCTION

2025 Vol. 19 No 1

<https://gynecology.su>

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <http://www.gynecology.su>. Не предназначено для использования в коммерческих целях. Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 649-54-95; эл. почта: info@irbis-1.ru.



Перспективные методы пренатальной диагностики на основе пассивных датчиков и машинного обучения

А.А. Ившин, В.М. Воробьева, Н.А. Малышев

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»; Россия, 185910 Петрозаводск, проспект Ленина, д. 33

Для контактов: Александр Анатольевич Ившин, e-mail: scipeople@mail.ru

Резюме

Введение. Пренатальная диагностика жизнедеятельности плода включает регулярную оценку таких показателей, как частота сердечных сокращений (ЧСС), двигательная активность и физиологическое состояние. Современные методы фетального мониторинга, основанные на использовании активных ультразвуковых волн, имеют ряд ограничений: недостаточно высокая диагностическая чувствительность и специфичность, отсутствие прогностической значимости и невозможность долговременного использования. Эти ограничения обуславливают необходимость разработки инновационных технологий для оценки функционального состояния плода.

Цель: обобщение передовых мировых разработок, альтернативных ультразвуковым системам длительного фетального мониторинга, позволяющих в режиме реального времени непрерывно регистрировать с помощью пассивных датчиков показатели жизнедеятельности плода и анализировать тренды с потенциально высокой диагностической и прогностической точностью.

Материалы и методы. Методология обзора включала анализ публикаций за последние 10 лет, включенных на основе критериев релевантности. Публикации были отобраны в соответствии с рекомендациями PRISMA (предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов). Для отбора использовались следующие ключевые слова на русском и английском языках: «современные методы пренатальной диагностики», «фетальный мониторинг», «оценка функционального состояния плода», «пассивные датчики», «искусственный интеллект», «машинное обучение», «current methods of prenatal diagnostics», «fetal monitoring», «assessment of fetus functional state», «passive sensors», «artificial intelligence», «machine learning». В результате поиска было обнаружено 69 статей в базе данных PubMed/MEDLINE, 17500 – в Google Scholar, 21 – в eLibrary и 3563 – в ResearchGate. Данные статьи были проанализированы с точки зрения их актуальности, соответствия тематике обзора и наличия экспериментальных данных. Из рассмотренных материалов также были исключены нерцензируемые публикации и дубликаты. В обзор были включены 8 наиболее релевантных статей, которые описывают перспективные методы пренатальной диагностики, основанные на применении экспериментальных устройств на базе пассивных датчиков.

Результаты. Проведенный литературный анализ позволил обобщить экспериментальные достижения современных методов пренатальной диагностики и продемонстрировал большие перспективы автоматизированных систем для оценки показателей жизнедеятельности плода, включая мониторинг ЧСС, двигательной активности плода и общего функционального состояния. Однако было установлено, что ни одна из описанных систем не достигает 100 % точности результатов, соответствующих данным кардиотокографии и ультразвукового исследования плода. Большинство экспериментальных систем остаются проводными, что ограничивает их использование с точки зрения мониторинга состояния плода. Перспективные системы пассивного мониторинга основаны на применении акселерометров, микрофонов и других сенсоров для оценки функционального состояния плода. Ключевой компонент этих технологий – использование искусственного интеллекта для обработки и интерпретации сигналов, что повышает точность и информативность мониторинга. Основной проблемой является создание эффективных алгоритмов обработки данных для их точной и однозначной интерпретации. Все рассматриваемые технологии пока являются экспериментальными, и требуется дальнейшая работа по улучшению алгоритмов и интеграции различных типов датчиков для обеспечения комплексного анализа.

Заключение. Представляют интерес технологии, использующие пассивные датчики для непрерывного и длительного контроля показателей жизнедеятельности плода, а также алгоритмы машинного обучения для анализа и интерпретации полученных данных. Носимые устройства на базе пассивных датчиков (акселерометров и цифровых микрофонов) позво-

лят улучшить пренатальную диагностику, обеспечивая высокую безопасность и раннее выявление осложнений беременности и состояния плода.

Ключевые слова: пренатальная диагностика, фетальный мониторинг, скрининг беременных, дистресс плода, искусственный интеллект, машинное обучение

Для цитирования: Ившин А.А., Воробьева В.М., Малышев Н.А. Перспективные методы пренатальной диагностики на основе пассивных датчиков и машинного обучения. *Акушерство, Гинекология и Репродукция*. 2025;19(1):68–81. <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2025.588>.

Promising methods of prenatal diagnostics based on passive sensors and machine learning

Aleksandr A. Ivshin, Vera M. Vorobyova, Nikita A. Malyshev

Petrozavodsk State University; 33 Lenin Avenue, Petrozavodsk 185910, Russia

Corresponding author: Aleksandr A. Ivshin, e-mail: scipeople@mail.ru

Abstract

Introduction. Prenatal diagnostics of fetal vital activity includes regular assessment of parameters such as heart rate (HR), motor activity and physiological state. Current methods of fetal monitoring based on using active ultrasound waves have a number of limitations: insufficiently high diagnostic sensitivity and specificity, lack of prognostic significance and impossible long-term use. These limitations necessitate a development of innovative technologies for assessing fetal functional state.

Aim: to summarize advanced global developments as an alternative to ultrasound systems for long-term fetal monitoring, allowing continuous real-time recording of fetal vital signs by using passive sensors and trend analysis with potentially high diagnostic and prognostic accuracy.

Materials and Methods. The review methodology included an analysis of publications released over the past 10 years, included based on relevance criteria. Publications were selected in accordance with the PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) guidelines. The following keywords in Russian and English were used for selection: "modern methods of prenatal diagnostics", "fetal monitoring", "assessment of fetus functional state", "passive sensors", "artificial intelligence", "machine learning". The search yielded 69 articles in the PubMed/MEDLINE database, 17,500 – in Google Scholar, 21 – in eLibrary, and 3,563 – in ResearchGate. Such articles were analyzed for relevance, relevance to the review topic, and availability of experimental data. Non-peer-reviewed publications and duplicates were also excluded from the reviewed materials. The most relevant 8 articles were included in the review, which describe promising methods of prenatal diagnostics based on the use of passive sensor experimental devices.

Results. The conducted literature analysis allowed to generalize the experimental achievements of current methods of prenatal diagnostics and demonstrated great promise for automated systems to assess fetal vital signs, including monitoring fetal HR, motor activity and general functional state. However, it was found that none of the described systems achieves 100 % accuracy of the results corresponding to fetal cardiotocography and ultrasound examination data. Most experimental systems remain wired, which limits their use for fetal monitoring. Promising passive monitoring systems are based on using accelerometers, microphones and other sensors to assess fetal functional state. A key component of such technologies is the use of artificial intelligence for signal processing and interpreting, which increases the accuracy and monitoring information content. The main problem is generation of effective data processing algorithms for their accurate and unambiguous interpretation. All the technologies under consideration are still experimental, and further work is required to improve the algorithms and integrate various types of sensors to ensure comprehensive analysis.

Conclusion. It is noteworthy that technologies employing passive sensors for continuous and long-term monitoring of fetal vital signs, in conjunction with machine learning algorithms for data analysis and interpretation are of particular interest. The use of wearable devices, based on passive sensors such as accelerometers and digital microphones, has the potential to enhance prenatal diagnostics, ensuring both enhanced safety and the early detection of pregnancy complications and fetal conditions.

Keywords: prenatal diagnostics, fetal monitoring, prenatal screening, fetal distress, artificial intelligence, machine learning

For citation: Ivshin A.A., Vorobyova V.M., Malyshev N.A. Promising methods of prenatal diagnostics based on passive sensors and machine learning. *Akusherstvo, Ginekologiya i Reprodukcya = Obstetrics, Gynecology and Reproduction*. 2025;19(1):68–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2025.588>.

Основные моменты**Что уже известно об этой теме?**

- ▶ Оценка функционального состояния плода является неотъемлемой частью акушерской практики. Существующие методы пренатальной диагностики, использующие датчики с активным ультразвуковым излучением, имеют ряд ограничений: отсутствие прогностической ценности, невозможность непрерывного длительного мониторинга показателей состояния плода, недостаточно высокая диагностическая точность. Это обуславливает необходимость разработки новых технологий для оценки функционального состояния плода, позволяющих преодолеть вышеописанные ограничения.
- ▶ На сегодняшний день ведутся разработки в области создания носимых систем, в основе которых лежит использование пассивных датчиков. Внедрение таких систем в перспективе позволит осуществлять длительный и непрерывный мониторинг показателей жизнедеятельности плода.

Что нового дает статья?

- ▶ Представлен обзор инновационных методов длительного мониторинга плода, использующих пассивные датчики, такие как акселерометры и микрофоны. Описаны системы, интегрирующие машинное обучение для анализа данных, что улучшает диагностическую точность и прогностические возможности. Приведен анализ преимуществ, недостатков и перспектив развития таких технологий.

Как это может повлиять на клиническую практику в обозримом будущем?

- ▶ Внедрение носимых систем фетального мониторинга на основе пассивных датчиков позволит осуществлять длительное и непрерывное наблюдение за состоянием плода в домашних условиях. Это обеспечит более точное и своевременное выявление дистресса и снизит частоту перинатальных осложнений. Новые технологии расширят доступность мониторинга и оптимизируют работу медицинского персонала.

Введение / Introduction

Пренатальная диагностика является обязательным компонентом скрининга беременных, но существующие методы оценки функционального состояния плода имеют ряд ограничений. В настоящее время наиболее широко используемыми методами пренатальной диагностики являются ультразвуковое исследование (УЗИ) и кардиотокография (КТГ).

Ультразвуковое исследование – метод диагностики, основанный на генерации звуковых волн высокой частоты, который позволяет визуализировать активность плода, оценивать его размеры и положение, выявлять различные анатомические аномалии. Однако метод не предусмотрен для непрерывного длительного мониторинга, а предназначен для оценки состояния плода лишь в узком временном интервале. Кроме того, УЗИ требует применения дорогостоящего громоздкого оборудования и помощи обученного медицинского персонала, а активные ультразвуковые волны при длительной экспозиции имеют известные неблагоприятные физические эффекты в виде нагревания тканей и эффекта кавитации и могут оказывать

Highlights**What is already known about this subject?**

- ▶ Assessment of fetal functional state is an integral part of obstetric practice. Existing methods of prenatal diagnostics using sensors with active ultrasound radiation have a number of limitations: lack of prognostic value, impossible continuous long-term monitoring of fetal health indicators, insufficiently high diagnostic accuracy. It necessitates development of new technologies to assess fetal functional state allowing to overcome the above limitations.
- ▶ To date, developments in the field of creating wearable systems based on the use of passive sensors are underway. The introduction of such systems in the future will allow for long-term and continuous monitoring of fetal vital signs.

What are the new findings?

- ▶ The article provides an overview on innovative methods for long-term fetal monitoring using passive sensors, such as accelerometers and microphones. It describes systems integrating machine learning for data analysis, which enhances diagnostic accuracy and prognostic potential. The article also analyzes the advantages, limitations, and development prospects for such technologies.

How might it impact on clinical practice in the foreseeable future?

- ▶ The implementation of wearable fetal monitoring systems based on passive sensors will enable long-term and continuous fetal observation in home settings. This will allow for more accurate and timely detection of fetal distress, reducing the incidence of perinatal complications. Such technologies will expand monitoring accessibility and optimize the workflow of healthcare professionals.

потенциальное негативное влияние на плод и течение беременности при длительном использовании.

Кардиотокография представляет собой метод функциональной оценки состояния плода во время беременности и родов, базирующийся на регистрации сердцебиения плода с помощью ультразвуковых волн. В основе данного метода лежит принцип изменения частоты и длины волны излучения, известный как эффект Доплера, при котором ультразвуковая волна, отражаясь от сокращающегося сердца плода, изменяет частоту. Кардиотокограф измеряет сердцебиение плода и сокращение матки и позволяет выявлять признаки дистресса плода. Главными недостатками КТГ являются недостаточно высокая диагностическая чувствительность и специфичность и отсутствие прогностической значимости. Метод требует использования сложного оборудования и помощи опытного медицинского персонала, а приборы для КТГ стационарны и не дают возможности наблюдения за плодом вне медицинских организаций.

В настоящее время в медицине активно развиваются технологии замещения амбулаторных диагностических процедур на дистанционный мониторинг

в домашних условиях. Это обусловлено тем, что дистанционный мониторинг позволяет своевременно выявлять изменение состояния здоровья пациента, динамически оценивать эффективность проводимого лечения и таким образом снижать нагрузку на амбулаторно-поликлиническое звено. Дистанционный мониторинг в акушерской практике является перспективным направлением пренатальной медицины и является оптимальным с медико-экономических позиций [1], но его внедрение требует обоснованного учета таких факторов как безопасность, эффективность и стоимость медицинской услуги.

Действующие протоколы наблюдения за течением беременности, основанные на применении УЗИ и КТГ, имеют ряд недостатков, главный из которых – ограничение времени одномоментного наблюдения за состоянием матери и плода и количества процедур во время беременности¹, в результате чего невозможно их использование для непрерывного суточного мониторинга [2].

Таким образом, существует необходимость разработки и внедрения систем для непрерывного длительного фетального мониторинга, обладающих высокой диагностической и прогностической значимостью за счет регулярной регистрации и анализа показателей жизнедеятельности плода и не оказывающих при этом негативного влияния на его состояние и здоровье беременной. Одним из перспективных направлений в этой области является использование пассивных датчиков – цифровых микрофонов и акселерометров для измерения жизненно-важных показателей плода, что в сочетании с микроконтроллерами и системами анализа данных в режиме реального времени на основе алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) позволит создавать недорогие и удобные в использовании решения для пренатального скрининга.

Цель: обобщение передовых мировых разработок, альтернативных ультразвуковым системам длительного фетального мониторинга, позволяющих в режиме реального времени непрерывно регистрировать с помощью пассивных датчиков показатели жизнедеятельности плода и анализировать тренды с потенциально высокой диагностической и прогностической точностью.

Материалы и методы / Materials and Methods

Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи:

– изучить передовые инновационные технологии фетального мониторинга, позволяющие анализировать частоту сердечных сокращений (ЧСС) и двигательную активность плода без применения ультразвука;

– установить технический уровень подготовки, особенности конструктивной и программной реализации указанных систем;

– определить пути развития систем длительного фетального мониторинга на основе безопасных технологий с возможностью своевременной диагностики дистресса плода и прогнозирования неблагоприятных перинатальных исходов для профилактики перинатальной заболеваемости и смертности.

Метод информационного поиска / Information retrieval method

В ходе работы изучались научные публикации, представленные в мировых рецензируемых журналах, материалы конференций, материалы, представленные в таких наукометрических базах, как PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, научные труды, представленные в научно-информационных сетях ResearchGate, Google Scholar и eLibrary. Информационный поиск позволил из большого количества научных статей извлечь оригинальные материалы, касающиеся изучаемой области и применяемые в мировой практике, и рассмотреть оригинальные подходы к решению рассматриваемой проблемы.

Метод анализа / Analysis method

Использование данного метода позволило обобщить и систематизировать собранную научную информацию, рассмотреть поставленную проблему как с точки зрения безопасного ее использования пациенткой, удобства использования медицинским персоналом, так и с точки зрения конструктивной реализации системы, структуры и взаимосвязи ее конструктивных элементов, способа и формы представления собираемых ею данных, возможности применения методов машинного обучения и нейросетей.

Метод сравнения / Comparison method

Данный метод использовался при сопоставлении данных из ранее опубликованных работ, выявлении закономерностей и тенденций развития систем длительного фетального мониторинга альтернативных ультразвуковым, установления достоинств и недостатков известных в мире аналогичных систем, формулировании тенденций и перспектив развития медицинских технологий в данном направлении.

Отбор публикаций по методологии PRISMA / PRISMA-based selection of publications

Для обзора были использованы базы данных PubMed/MEDLINE, Google Scholar, eLibrary и ResearchGate. Проводился анализ статей за последние 10 лет с использованием ключевых слов

¹ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации № 1130н от 20 октября 2020 г. «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи по профилю "акушерство и гинекология"». М., 2020. 688 с. Режим доступа: http://perinatcentr.ru/files/N_1130.pdf.

и фраз: «современные методы пренатальной диагностики», «фетальный мониторинг», «оценка функционального состояния плода», «пассивные датчики», «искусственный интеллект», «машинное обучение», «current methods of prenatal diagnostics», «fetal monitoring», «assessment of fetus functional state», «passive sensors», «artificial intelligence», «machine learning». Поиск статей проводился на русском и английском языках, что позволило обеспечить широкий спектр исходных для анализа данных и представить как можно более полное описание состояния данного вопроса в мировом масштабе. В результате поиска было обнаружено 69 статей в базе данных PubMed/MEDLINE, 17500 – в Google Scholar, 21 – в eLibrary и 3563 – в ResearchGate. При первичном изучении были исключены статьи, не относящиеся к тематическим экспериментальным исследованиям, например, теоретические работы с отсутствием эмпирических данных, или же статьи, не включающие в себя актуальную информацию об использовании экспериментальных устройств на основе пассивных датчиков применительно к пренатальной диагностике и о применении методов машинного обучения для оценки функционального состояния плода.

Дальнейший отбор публикаций проводился по методологии, соответствующей рекомендациям PRISMA. Были определены критерии включения – актуальность исследования, приведенные результаты по оценке эффективности и надежности предлагаемого решения, наличие и сложность методов машинного обуче-

ния. Далее осуществлялась проверка на соответствие критериям включения в текущий обзор. В результате поиска было отобрано 8 статей для окончательного анализа и включения в обзор после удаления дублирующихся и нецелевых публикаций. Схема отбора публикаций представлена следующим образом:

- 1) поиск в базе данных по ключевым словам;
- 2) первичный отбор по заголовкам и аннотациям статей;
- 3) исследование и анализ отобранных статей, оценка качества и релевантности;
- 4) исключение дубликатов и публикаций, несоответствующих тематике обзора;
- 5) включение в обзор статей, соответствующих критериям PRISMA.

Данный подход позволил провести детальный и систематический обзор современных перспективных методов оценки функционального состояния плода на основе пассивных датчиков и машинного обучения. Схематическое представление отбора публикаций представлено на **рисунке 1**.

Результаты / Results

Экспериментальные решения для мониторинга частоты сердечных сокращений плода / Experimental solutions for fetal heart rate monitoring

Современные технологии предоставляют широкий выбор методов для мониторинга состояния плода во время беременности. Одним из инновацион-



Рисунок 1. Алгоритм поиска публикаций.

Figure 1. Publication selection algorithm.

ных решений является экспериментальная пассивная система непрерывного мониторинга сердца плода Paris (рис. 2) [3]. Аппаратная часть системы включает в себя пассивные акустические датчики, прикрепляемые к телу беременной для регистрации работы сердца плода, а также управляющую плату, которая собирает данные с датчиков и передает их в приложение. Для создания датчиков используются микрофоны на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые устанавливаются в корпусах в форме стетоскопа из кремниевого каучука.

Система Paris была апробирована на 16 беременных в возрасте от 22 до 44 лет и показала высокую точность в измерении сердечного ритма плода, средняя ошибка составляет 4,3 удара в минуту по сравнению с сертифицированным кардиомонитором для оценки сердечного ритма плода Littmann².

В 2022 г. исследователи Калифорнийского университета разработали метод оценки ЧСС плода³, основанный на извлечении абдоминальной электрокардиограммы (ЭКГ) матери при помощи брюшного пластыря (рис. 3), в который встроен алгоритм Lullaby, обеспечивающий высокую скорость вычислений и позволяющий выделять сердцебиения плода, исключать помехи от ЭКГ матери.

Группой ученых из Китая в 2020 г. было проведено исследование для получения высококачественного сигнала сердечных сокращений плода при помощи оригинального датчика, спроектированного по принципу стетоскопа, в котором для преобразования звука в электрический сигнал используется пьезоэлектрическая пленка из поливинилдентофторида (ПВДФ) [4]. Передача сигнала осуществляется по беспроводной Bluetooth системе (рис. 4), состоящей из двух

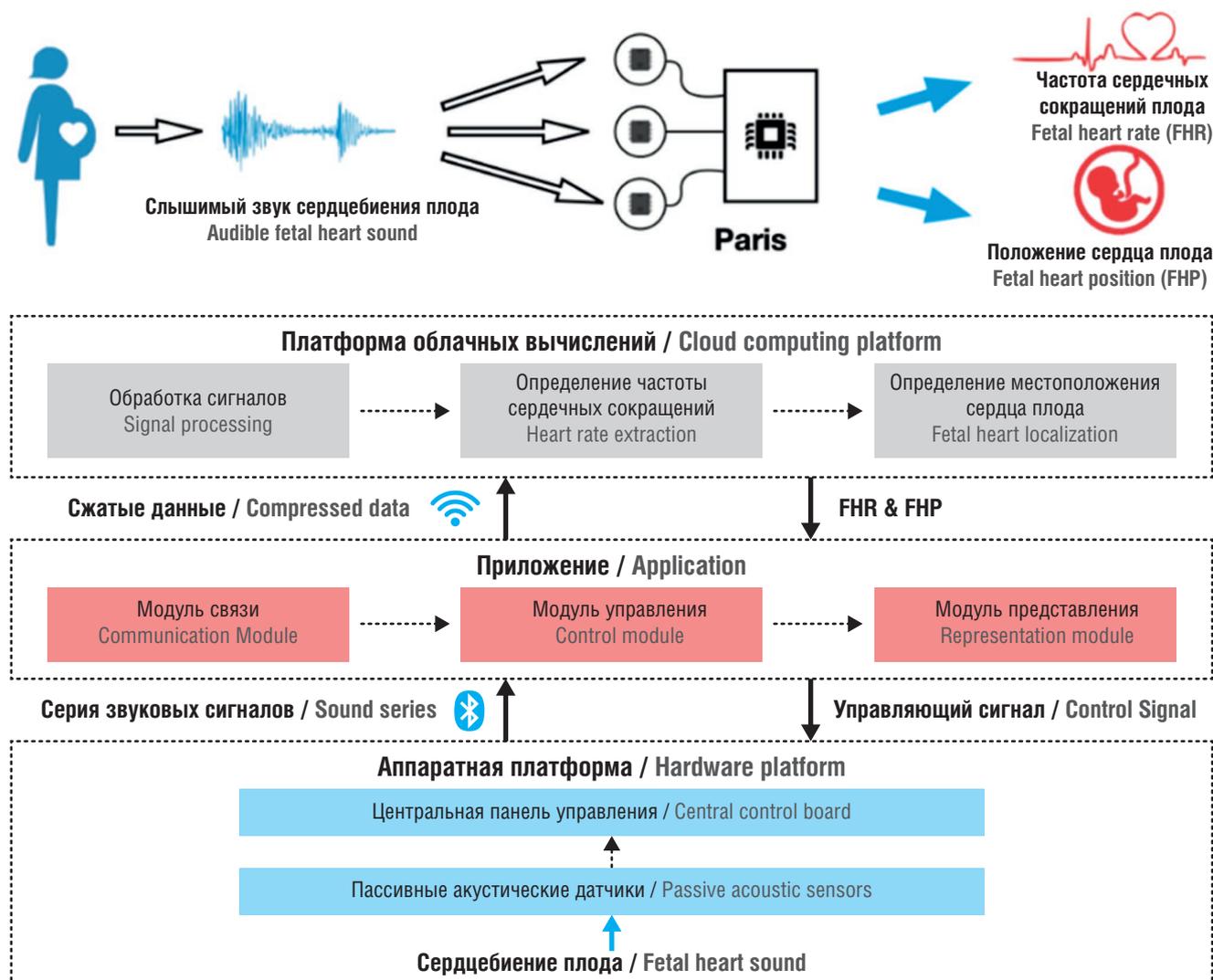


Рисунок 2. Схема работы системы Paris [3].

Figure 2. Paris system operation diagram [3].

² 3M™ Littmann® Stethoscopes. Available at: https://www.littmann.com/3M/en_US/p/

³ UCI engineers develop fetal monitoring technology. The Henry Samueli School of Engineering at UC Irvine 2022. Available at: <https://engineering.uci.edu/news/2022/11/uci-engineers-develop-wearable-fetal-monitoring-technology/>.

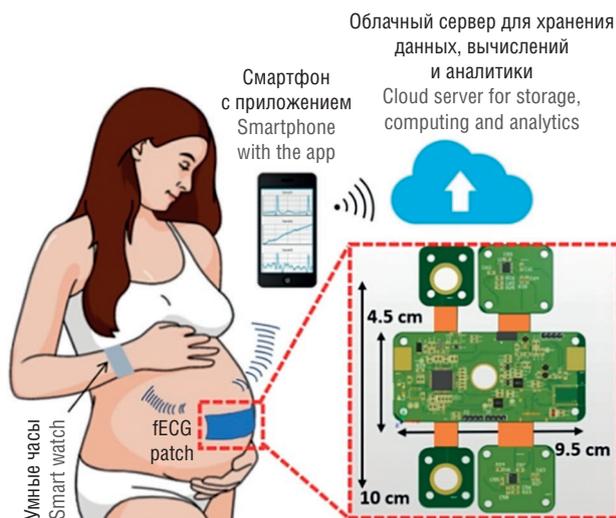


Рисунок 3. Система полного мониторинга электрокардиограммы плода, разработанная в Калифорнийском университете³.

Примечание: fECG patch – электрокардиографический пластырь.

Figure 3. A full-fledged fetal electrocardiogram monitoring system developed at the University of California³.

Note: fECG patch – electrocardiographic patch.

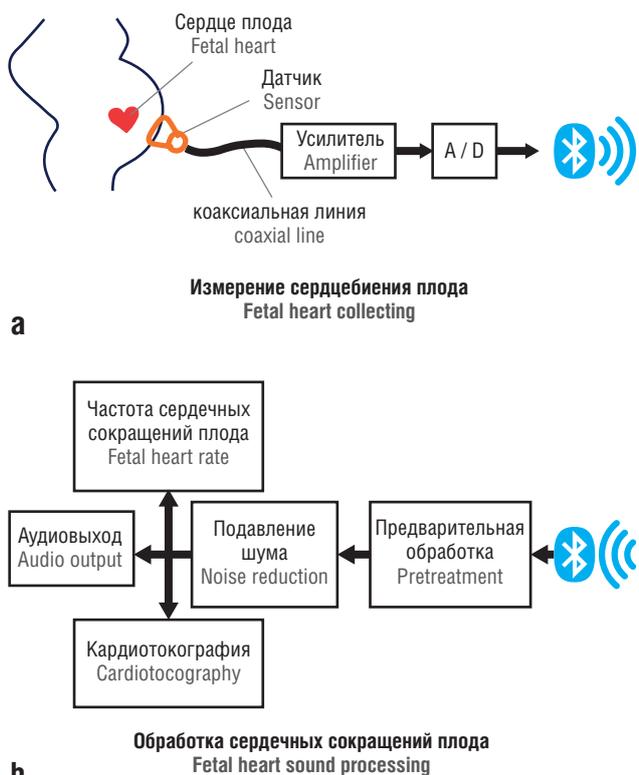


Рисунок 4. Структура беспроводной системы мониторинга сердечных сокращений плода: регистрация сигнала (а) и его обработка на терминале (б) [5].

Примечание: A/D – аналогово-цифровой преобразователь.

Figure 4. The structure of the wireless fetal heart rate monitoring system: electrocardiograms signal registration (a) and its processing at the terminal (b) [5].

Note: A/D – analog-to-digital converter.

основных модулей: модуля регистрации сигнала звука сердца плода и модуля обработки извлеченного сигнала. Для уменьшения помех со стороны матери используется метод опорных векторов (англ. support vector machine, SVM) [5].

В 2020 г. предложено решение для удаленного мониторинга сердечного ритма плода и матери – беспроводная система «Invu» [6], собранная на поясе, закрепляемом на животе беременной (рис. 5). Система состоит из 4 акустических датчиков в виде высокочувствительных микрофонов, преобразующих звуковые волны в аналоговый электрический сигнал, и 8 пассивных электрических датчиков (датчиков биопотенциала).

Передача сигнала с датчиков на смартфон осуществляется посредством Bluetooth. Со смартфона данные передаются на облачные серверы, где анализируются с помощью оригинального алгоритма. На основе электрических и акустических сигналов строятся диаграммы ЧСС плода (англ. fetal heart rate, FHR) и ЧСС матери (англ. maternal heart rate, MHR). Исследование данной системы проводилось на 147 женщинах. Сравнение результатов, полученных Invu, с результа-



Рисунок 5. Беспроводная система Invu для удаленного мониторинга состояния плода [6].

Figure 5. Invu wireless system for remote monitoring of fetal health [6].

тами, полученными при помощи КТГ, представлено на **рисунке 6**. Как можно видеть, значения FHR и MHR, полученные Invu на основе ЭКГ плода и матери соответственно, значительно коррелируют с результатами измерения при помощи КТГ (0,92 для FHR и 0,97 для MHR). Погрешность в измерении ЧСС с помощью Invu составила ± 8 ударов в минуту относительно эталонного сигнала, которым в данном случае выступают результаты ЧСС по КТГ, что является клинически приемлемым диапазоном [7].

Экспериментальные решения для мониторинга двигательной активности плода / Experimental solutions for monitoring fetal motor activity

В работе N.D. Zakaria с соавт. предлагается система регистрации движений плода, основанная на использовании 6 трехосевых акселерометров, подключенных к микроконтроллеру Arduino (Arduino, Италия) [8]. Данная система (**рис. 7**) позволяет получать данные в режиме реального времени. В качестве модуля вывода используется интерфейс Matlab.

В 2023 г. учеными из Китая предложена система для детекции двигательной активности плода [9], в основе которой лежит использование двух акселерометров, управляющего чипа Cortex-M4, Bluetooth-антенны, смартфона (**рис. 8**). Распознавание движений плода осуществляется в несколько этапов: регистрация сигнала акселерометром, предварительная обработка сигнала, предварительное определение амплитудного порога, распознавание движений плода при

помощи разработанного алгоритма и классифицирование с помощью алгоритма поиска ортогонального соответствия (англ. orthogonal matching pursuit, OMP) [10] и сохранение результатов.

Тестирование предлагаемой системы проводилось на 4 первобеременных, находящихся в положении лежа. В качестве эталона использовался метод Пирсона [7]. Средний уровень распознавания реальных движений плода составил 89,74 %, что свидетельствует о высокой точности системы и подтверждает возможность ее использования для мониторинга двигательной активности плода.

В 2020 г. была представлена экспериментальная носимая система для долгосрочного мониторинга движений плода [11]. Система состоит из 4 акселерометров (NXP, MMA8451Q), управляющей платы, включающей в себя 32-битный высокопроизводительный микроконтроллер (NXP, Kinetis KL16), аккумулятор и встроенный интерфейс для беспроводной передачи данных Bluetooth, и графического интерфейса на базе Android (**рис. 9**). Для получения эталонного сигнала методом Пирсона [7] в систему была добавлена кнопка для нажатия беременной в момент шевелений плода.

В данной системе собираемые с датчиков сигналы сначала анализируются отдельно, а затем результаты подаются в нечеткий классификатор ARTMAP (англ. adaptive resonance theory map) для дальнейшей обработки и совместного их анализа [12]. ARTMAP обеспечивает эффективную классификацию и иденти-

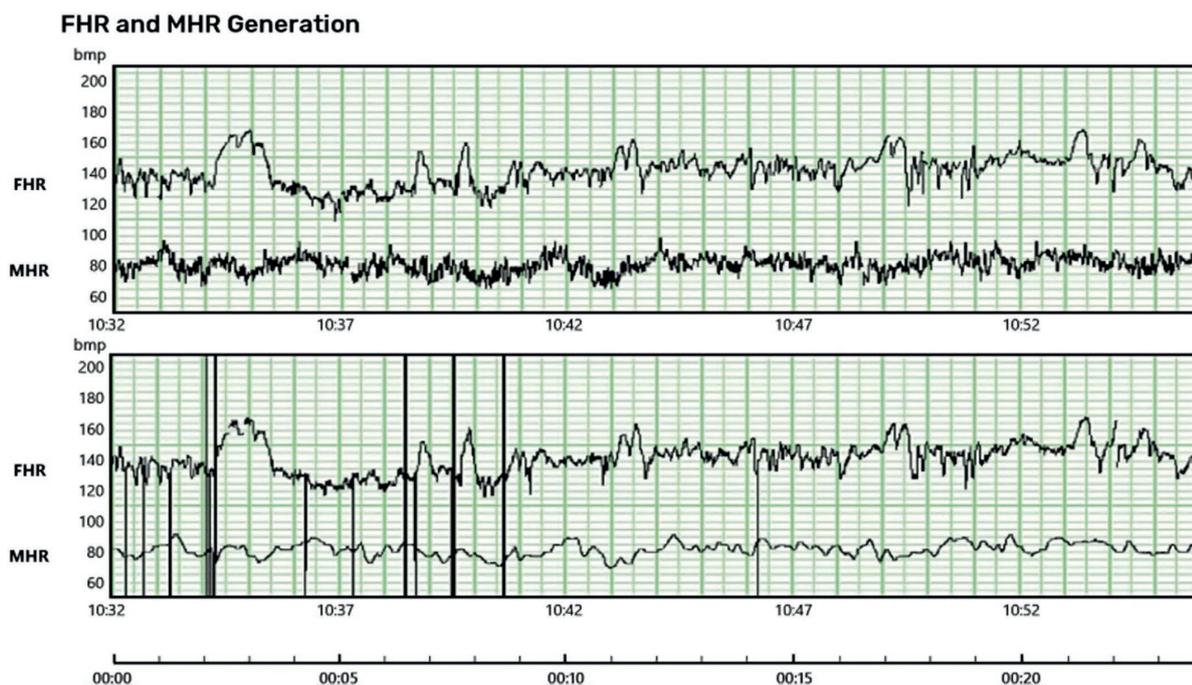


Рисунок 6. Частота сердечных сокращений плода (FHR) и частота сердечных сокращений матери (MHR), полученных при помощи системы Invu (верхний график) и кардиотокографии (нижний график) [6].

Figure 6. Fetal heart rate (FHR) and maternal heart rate (MHR) obtained using the Invu system (upper graph) and cardiotocography (lower graph) [6].

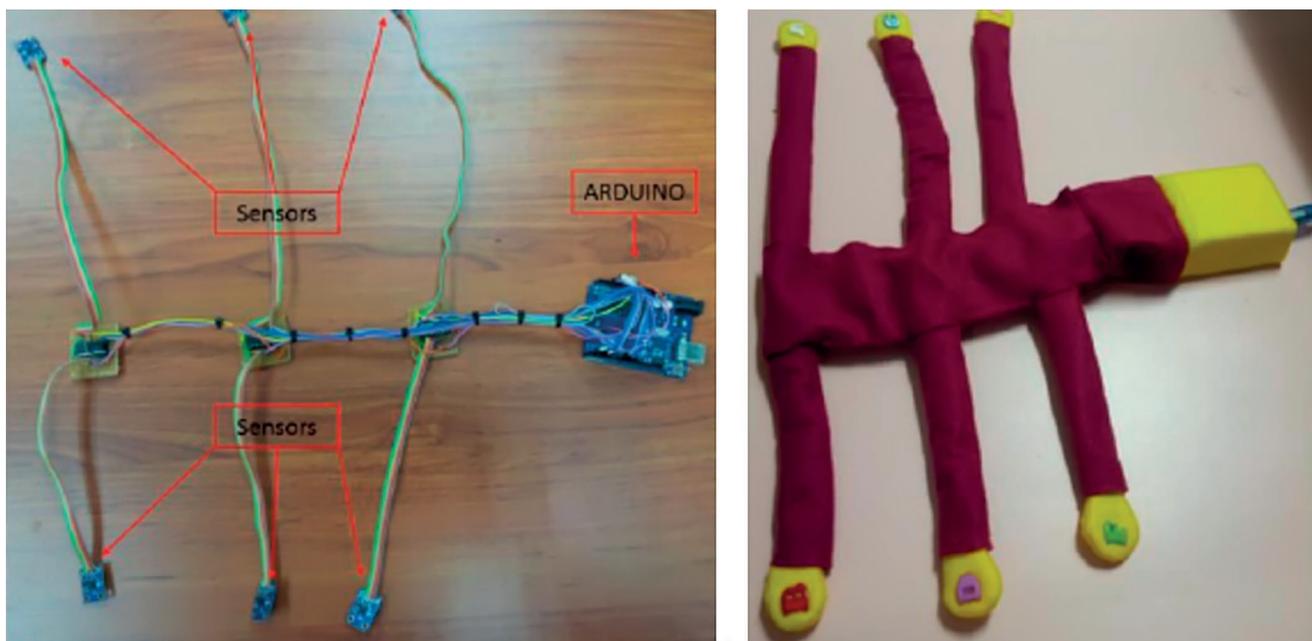


Рисунок 7. Устройство системы для регистрации сигналов двигательной активности [8].

Figure 7. The system composition for motor activity signals recording [8].

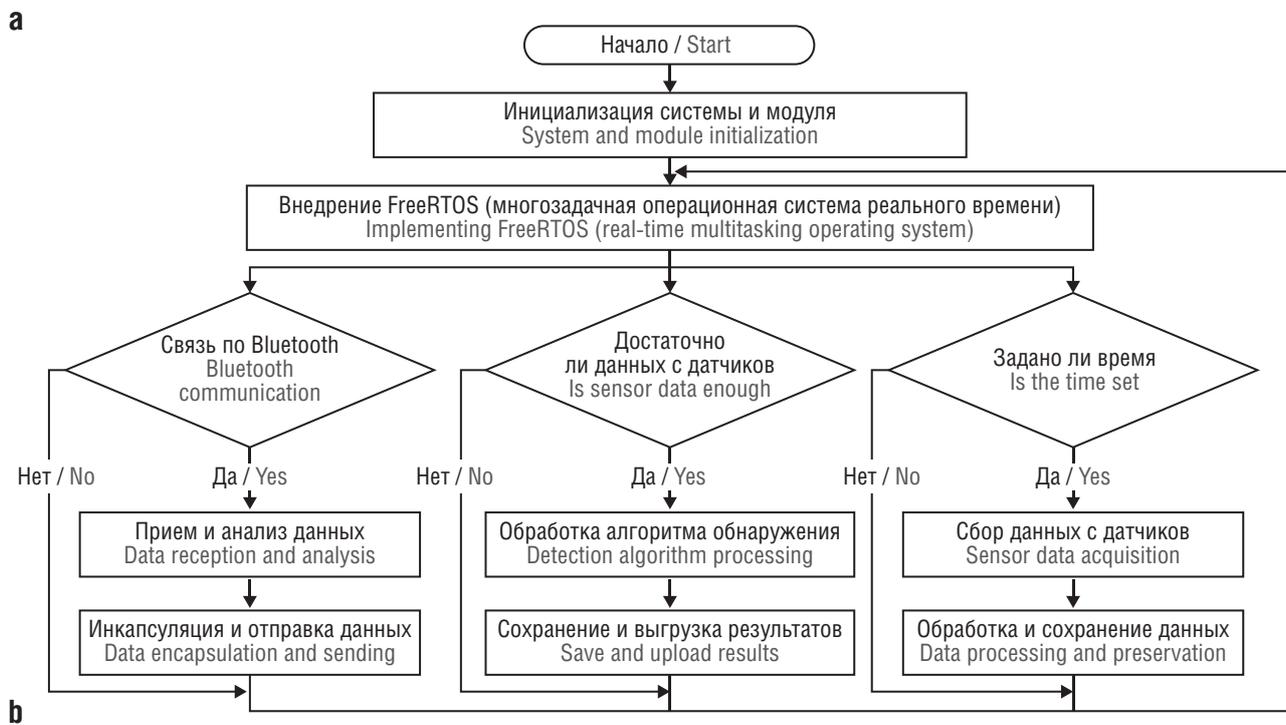
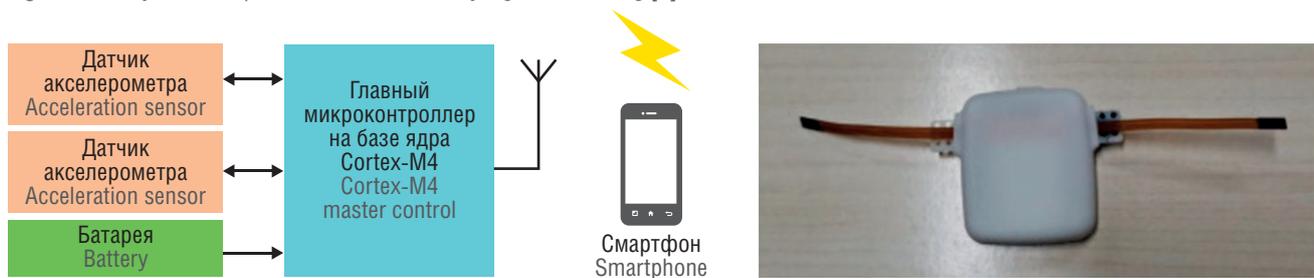


Рисунок 8. Блок-схема носимой системы для детекции двигательной активности плода: структура и схема прототипа (а) и общая блок-схема разработки программного обеспечения (б) [10].

Figure 8. Flowchart of a wearable system for fetal motor activity detection: the structure and scheme of the prototype (a) and the general flowchart of software development (b) [10].



Рисунок 9. Носимая система для мониторинга плода [11].

Примечание: 1 – датчик акселерометра (всего в системе установлено 4 датчика); 2 – основная печатная плата, упакованная в небольшую коробку, содержащую микроконтроллер, систему на кристалле для беспроводной передачи данных и аккумулятор; 3 – смартфон (Android) и приложение.

Figure 9. A wearable fetal monitoring system [11].

Note: 1 – the accelerometer sensor (totally 4 sensors are mounted on the system); 2 – the main circuit board packaged into a small box, containing a microcontroller, a system-on-chip for wireless transmission and a battery; 3 – smartphone (Android) and app.

фикацию движений на основе постепенного обучения и обновления параметров без риска забывания ранее изученной информации. Данная система была испытана на 14 беременных на сроке 25–39 недель и продемонстрировала высокую специфичность (99 %) и чувствительность (77 %).

В работе М. Altini с соавт. приведены результаты оценки повышения эффективности обнаружения толчков плода при использовании нескольких акселерометров, расположенных на теле беременной [13]. Экспериментальное исследование проводилось на 6 беременных, находящихся в положении лежа, и включало 15 измерений в течение 20 минут. При измерениях использовали 6 акселерометров (5 были расположены на животе беременной, один расположен на спине в качестве эталонного) и аналого-цифровой преобразователь Porti 7⁴ для дискретизации сигнала с частотой 128 Гц. Данные акселерометров подвергались полосовой фильтрации от 1 до 20 Гц [14] с помощью БИХ-фильтра Баттерворта 2-го порядка. Для сравнения использовался метод Пирсона [7].

В работе U. Delay с соавт. предложен гибридный алгоритм распознавания движений с использованием неинвазивной системы, включающей в себя датчик MPU 9250 (многокристальный модуль, содержащий трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп и имеющий встроенный аналого-цифровой преобразователь), микроконтроллер Microchip ATmega328P (Microchip Technology, США), встроенный в плату

Arduino Uno (Arduino, Италия), стандартный внешний блок питания. Клинические испытания проводились на 15 беременных, в среднем каждая запись длилась по 20 минут [15].

В 2024 г. был предложен метод мультимодального обнаружения шевелений плода с помощью носимого монитора [16]. Аппаратная часть такого монитора состоит из гетерогенной сенсорной сети и миниатюрной системы сбора данных и датчиков, встроенных в эластичный ремень (рис. 10).

Гетерогенная сеть основана на комбинации 3 типов датчиков: акселерометр, акустический датчик и пьезоэлектрическая диафрагма. Также в систему входит дополнительный акселерометр (англ. inertial measuring unit, IMU), служащий для обнаружения движений тела матери. Данная система предполагает использование алгоритмов машинного обучения для различения сигналов движений плода (англ. fetal movements, FM) и всех сторонних сигналов (не-FM).

Обсуждение / Discussion

В ходе информационного поиска был найден ряд материалов, свидетельствующих об успешных альтернативных ультразвуковым экспериментальных системах, способных отслеживать ЧСС плода, обнаруживать и записывать сигналы двигательной активности плода без использования ультразвуковых волн [1, 2]. При этом следует отметить, что некоторые системы вклю-

⁴ Health Link Holdings. User manual for Porti 7. 2017. 28 p. Available at: https://www.healthlinkholdings.com/site/assets/files/1748/user_manual_porti7_en-rev8.pdf.

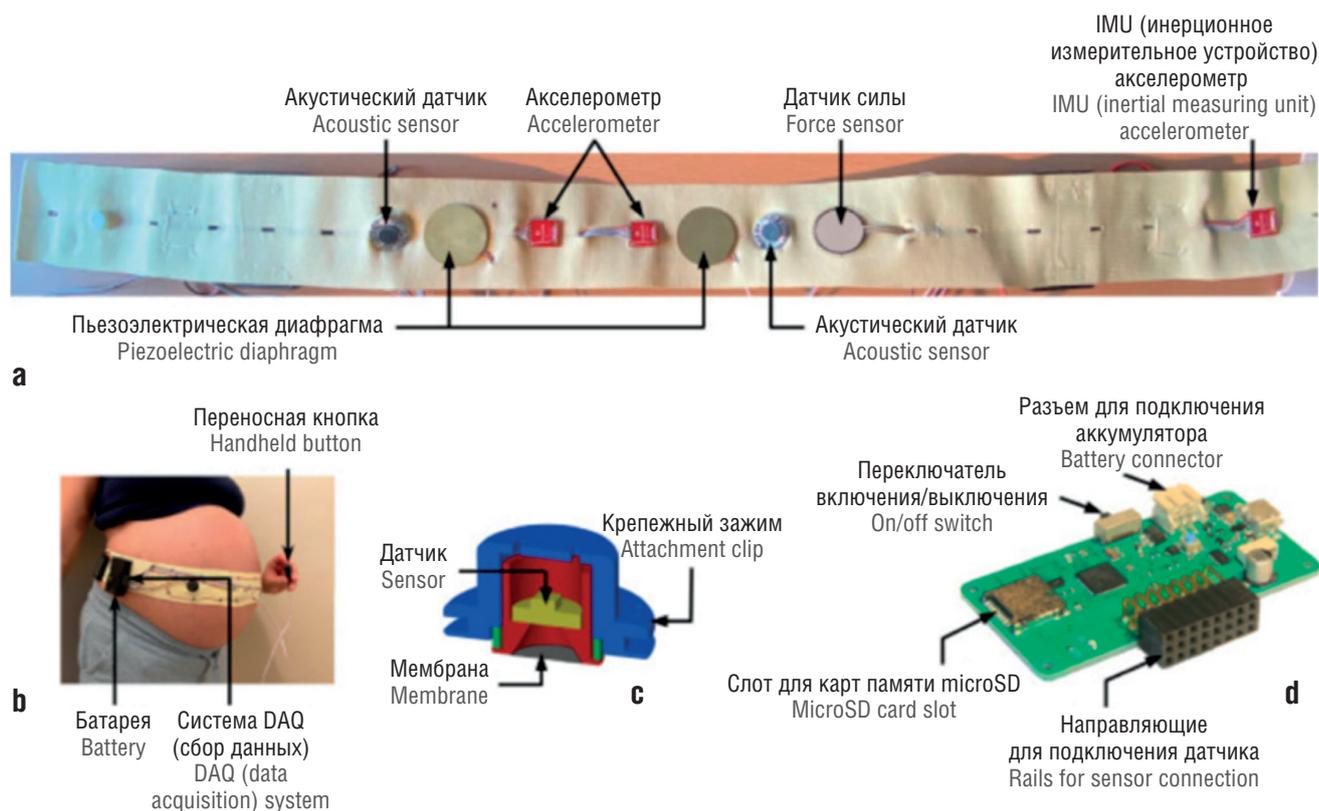


Рисунок 10. Аппаратная система для носимого монитора: (а) датчики, встроенные в эластичный ремень, (б) эластичный пояс, (с) акустический датчик, (д) миниатюрная система сбора данных [16].

Figure 10. Hardware system for a wearable monitor: (a) sensors embedded in an elastic belt, (b) an elastic waistband, (c) an acoustic sensor, (d) a miniature data acquisition system [16].

чают в себя ультразвуковые излучатели, но они не задействованы в работе основной системы, а используются только для получения эталонного сигнала и проведения сравнительного анализа [2]. Для установления точности систем в качестве эталонного метода чаще всего используется метод Пирсона, для чего измерительную систему оснащают ручным переключателем, на которой нажимает беременная, ощущая шевеления плода. При этом каждое нажатие может сопровождаться подачей звукового сигнала для привлечения внимания врача, проводящего исследование [1, 7].

Альтернативные системы пренатальной диагностики основаны на использовании пассивных датчиков. Для сбора информации о ЧСС плода используются высокочувствительные микрофоны и акустические датчики [3, 4–7].

Основная проблема таких систем связана с обработкой получаемого сигнала, а именно, сложностью фильтрации внешних шумов, наличие которых существенно затрудняет анализ полезного сигнала. Это требует от ученых создания сложных алгоритмов управления микроконтроллерами с применением нейронных сетей и методов машинного обучения. Одним из наиболее распространенных методов классификации, используемых для обработки медицинских сигналов при высоком уровне шума, передаваемых

датчиками сигналов, является метод, основанный на использовании сверточной нейронной сети (англ. convolutional neural network, CNN) [17].

Для удобства использования в такие системы встраиваются модули беспроводной связи; чаще всего это Bluetooth модули, позволяющие дистанционно передавать сигналы и осуществлять управление через приложение со смартфона или электронно-вычислительной машины [4, 6, 9, 11].

Обзор альтернативных ультразвуковых систем мониторинга двигательной активности плода показал, что в данной области широко используются трехосные акселерометры с высокой чувствительностью и низким уровнем шума, которые не оказывают негативного влияния на течение беременности и развитие плода, что является необходимым условием для многочасового мониторинга. Для передачи данных с акселерометров на контроллер чаще всего используется протокол I2C. В качестве устройства для сбора данных нашел применение трехосный акселерометр MC3672, характеризующийся сверхнизким энергопотреблением, высокой чувствительностью и низким уровнем шума [8–11].

Увеличение числа датчиков ведет к необходимости обработки большого объема информации, что увеличивает объем вычислительных операций, требует

более высоких скоростей вычисления, ведет к повышенному энергопотреблению, увеличению размеров носимого устройства, объема хранимых и передаваемых к устройству вывода данных. Поэтому число датчиков должно быть минимальным.

Акселерометры позволяют фиксировать 3 основных типа сигналов: сигнал движения беременной, сигнал сердцебиения матери и сигнал движения плода. Основной проблемой использования систем с подобными датчиками является сложность обработки и интерпретации фиксируемых сигналов. Сигналы, связанные с сердцебиением матери, более слабые по сравнению с сигналами движения плода. Движения беременной являются одной из основных проблем обнаружения двигательной активности плода, поскольку они могут имитировать сигналы движения плода.

К мониторингу движений плода может быть применен частотно-временной подход, описанный S. Layeghu с соавт. [18], согласно которому используется оригинальный метод обработки сигналов плода на основе акселерометров, включающий регистрирующую систему, состоящую из 4 акселерометров ADXL 330, три из которых располагают на животе беременной, а один – на груди беременной для исключения дыхания матери из полезного сигнала. Используемый в данной системе метод классификации на основе SVM сигналов с датчиков показал общую точность 92,19 % с высоким значением (95,4 %) прогностической ценности (positive predictive value, PPV) и F1-мерой (93,2 %), несмотря на относительно высокий уровень ложноположительных результатов (10,8 %).

Анализ конструктивной реализации рассмотренных систем контроля двигательной активности плода показал, что в дополнение к основным акселерометрам они предусматривают использование эталонного акселерометра, обычно располагаемого на спине беременной и фиксирующего движения матери. В дополнение экспериментальные системы по мониторингу двигательной активности плода предусматривают наличие кнопки для беременной, нажимаемой в момент шевелений плода с целью получения эталонного сигнала методом Пирсона [7].

При создании систем мониторинга следует учитывать то обстоятельство, что при проведении одновременно мониторинга нескольких пациенток они не должны создавать помех в работе других приборов. Поэтому конструкции приборов, в основе которых лежит передача информации по радиоканалам, должна предусматривать возможность работы на разных радиочастотах. Из-за требований электромагнитной совместимости полосы частот разных каналов должны отличаться не менее чем на 25 кГц.

Системы дистанционного мониторинга, содержащие беспроводные датчики, должны обеспечивать передачу сигнала от передатчиков, которые устанавливаются на пациентке, к приемнику, который обычно вхо-

дит в состав базовой станции, на значительные расстояния, чтобы существенно не ограничивать свободу перемещения пациентки и не создавать неудобства медицинскому персоналу. Беспроводной интерфейс должен обеспечивать достаточно высокий темп передачи и при этом не создавать нежелательного радиоблучения плода во время его мониторинга, а также потреблять минимальное количество энергии, поскольку от этого зависит длительность работы аккумуляторной батареи, встроенной в беспроводной датчик.

При создании систем, основанных на использовании беспроводной связи, необходимо учитывать то обстоятельство, что при передаче данных возможна потеря сигнала, поэтому они должны обеспечивать сохранность переданных данных и возможность их повторной отправки после восстановления связи. На случай потери питания системы мониторинга должны оснащаться энергонезависимой памятью.

Недостатком системы, в которой для связи между датчиками и приемником сигнала используются электрические кабели, является то, что они, во-первых, ввиду своей громоздкости и наличия длинных проводов доставляют дискомфорт пациентке при длительном мониторинге, а во-вторых, в ряде случаев создают существенные помехи для медперсонала при проведении медицинских процедур. В ходе исследования также установлено, что такие проводные системы представляют потенциальную опасность поражения электрическим током [2].

Заключение / Conclusion

Проведенный анализ продемонстрировал ряд автоматизированных систем для оценки показателей жизнедеятельности плода – ЧСС, двигательной активности и общего физиологического состояния. При этом ни одна из систем не является безупречной, их специфичность и чувствительность в оценке и прогнозировании состояния плода не достигают 100 %. При наличии автоматизированной системы анализа присутствие врача не обязательно, и диагностику может выполнить специалист-техник, что актуально для медицинских сообществ с системой разделения на специалистов, осуществляющих сбор данных пациента, и врачей, проводящих диагностику. В то же время существует и ряд фетальных мониторов, не обладающих функциями анализа. Однако такие приборы широко используются, так как квалифицированный врач способен самостоятельно оценить состояние плода по данным мониторинга.

Большинство доступных в настоящее время медицинских устройств для мониторинга и контроля являются проводными, что ограничивает возможности медперсонала и пациентов. Сенсорные мобильные облачные вычисления представляются лучшей альтернативой в рабочей среде.

Одной из основных проблем при создании систем мониторинга функционального состояния плода является разработка корректных и эффективных алгоритмов обработки данных для получения результатов, пригодных для однозначной интерпретации и дальнейшего анализа.

Создание носимых систем для длительного мониторинга функционального состояния плода представляет собой прогрессивное направление в области пренатальной диагностики. Перспективные методы пренатальной диагностики основываются на использовании в целях контроля двигательной активности плода акселерометров, а для оценки показателей жизнедеятельности плода – акустических датчиков и микрофонов, что позволяет не только обеспечить высокую точность и безопасность при фетальном мониторинге, но и открывает новые возможности для раннего выявления дистресса плода и профилактики перинатальной заболеваемости и смертности. Применение таких систем позволит медицинскому персоналу получать более полную информацию о состоянии плода в режиме реального времени и оказывать своевременную и квалифицированную медицинскую помощь.

Учеными различных стран предлагаются инновационные методы пренатальной диагностики альтернативные ультразвуковым, основанные на использовании пассивных датчиков для регистрации данных и нейронных сетей для агрегации и обработки собранной информации. Альтернативная система мо-

нитинга для пренатальной диагностики должна содержать минимальное количество электродов, накладываемых на грудную клетку и переднюю брюшную стенку беременной, обеспечивать качественный электрический контакт электродов с кожей в течение длительного времени. Используемое в таких системах программное обеспечение должно корректно выделять сигналы, характеризующие функциональное состояние плода на фоне активности матери, и обладать высокой достоверностью результатов диагностики.

Принимая во внимание многообещающие результаты работ, рассмотренных в данном обзоре, следует отметить, что все предлагаемые устройства носят экспериментальный характер и до настоящего времени не применяются в клинической практике. Необходимы исследования в области улучшения алгоритмов обработки данных, получаемых с датчиков, для повышения точности данных и возможности стабильной и долговременной обработки сигналов в режиме реального времени. Кроме того, перспективным видится объединение разных видов датчиков – акселерометров и микрофонов в одной системе для одновременного комплексного анализа показателей жизнедеятельности плода.

Таким образом, разработка и внедрение передовых систем для мониторинга состояния плода, основанных на современных технологиях, открывают новые перспективы в области акушерства и гинекологии и способны улучшить качество пренатальной диагностики.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
<p>Поступила: 20.11.2024. В доработанном виде: 15.01.2025. Принята к печати: 17.01.2025. Опубликована онлайн: 17.01.2025.</p>	<p>Received: 20.11.2024. Revision received: 15.01.2025. Accepted: 17.01.2025. Published online: 17.01.2025.</p>
Вклад авторов	Author's contribution
Все авторы принимали равное участие в сборе, анализе и интерпретации данных.	All authors participated equally in the collection, analysis and interpretation of the data.
Все авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи.	All authors have read and approved the final version of the manuscript.
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interests.
Финансирование	Funding
Работа проведена в рамках реализации Программы поддержки научных исследований и опытно-конструкторских разработок студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.	The work was carried out as part of the implementation of the Program for supporting scientific studies and experimental development of students, postgraduates and persons with academic degree, funded by the Government of the Republic of Karelia.
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство ИРБИС снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации.	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS Publishing disclaims any responsibility for any injury to peoples or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content.
Права и полномочия	Rights and permissions
ООО «ИРБИС» обладает исключительными правами на эту статью по Договору с автором (авторами) или другим правообладателем (правообладателями). Использование этой статьи регулируется исключительно условиями этого Договора и действующим законодательством.	IRBIS LLC holds exclusive rights to this paper under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s). Usage of this paper is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

Литература:

1. Репина Е.С., Костелей Я.В., Буреев А.Ш. и др. Современные возможности дистанционного мониторингирования состояния плода. *Мать и дитя в Кузбассе*. 2022;(4):12–7.
2. Шульгин В.И., Антончик О.Н. Система диагностики состояния плода и матери в ходе беременности. *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: информатика и моделирование*. 2016;(21):170–83.
3. Yao Y., Ning Z., Zhang Q., Zhu T. Paris: Passive and continuous fetal heart monitoring system. (Q126840888). *Smart Health*. 2019;17:100087. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2019.100087>.
4. Wei J., Wang Z., Xing X. A wireless high-sensitivity fetal heart sound monitoring system. *Sensors*. 2021;21(1):193. <https://doi.org/10.3390/s21010193>.
5. Statnikov A., Aliferis C.F., Hardin D.P., Guyon I. A gentle introduction to support vector machines in biomedicine: volume 1: theory and methods. *World Scientific Publishing Co*, 2011. 183 p. <https://doi.org/10.1142/7922>.
6. Mhajna M., Schwartz N., Levit-Rosen L. et al. Wireless, remote solution for home fetal and maternal heart rate monitoring. *Am J Obstet Gynecol MFM*. 2020;2(2):100101. <https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2020.100101>.
7. ACOG Practice Bulletin No. 106: Intrapartum fetal heart rate monitoring: nomenclature, interpretation, and general management principles. *Obstet Gynecol*. 2009;114(1):192–202. <https://doi.org/10.1097/AOG.0b013e3181aef106>.
8. Zakaria N.D., Numan P.E., Malarvili M.B. Fetal movements recording system using accelerometer sensor. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(3):1022–32.
9. Qin M., Xu Y., Liang Y., Sun T. A wearable fetal movement detection system for pregnant women. *Front Med*. 2023;10:1160373. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1160373>.
10. Cai T.T., Wang L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2011;57(7):4680–8. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2146090>.
11. Zhao X., Zeng X., Koehl L. et al. Wearable system for in-home and long-term assessment of fetal movement. *IRBM*. 2019;41(4):205–11. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2019.11.003>.
12. Garcia-Breijo E., Garrigues J., Sanchez L., Laguarda-Miro N. An embedded simplified fuzzy ARTMAP implemented on a microcontroller for food classification. *Sensors*. 2013;13(8):10418–29. <https://doi.org/10.3390/s130810418>.
13. Altini M., Mullan P., Royackers M. et al. Detection of fetal kicks using wearable accelerometers during pregnancy: a trade-off between sensor number and placement. *Annu Inter Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2016;2016:5319–22. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591928>.
14. Арбузов Г.Н., Сипович А.С., Шобик И.П. Сравнение алгоритмов обработки сигнала акселерометра, используемого для определения неуравновешенности ротора в стенде балансировки. Информационные технологии и системы 2023 (ИТС 2023): материалы Международной научной конференции. Минск, 2023. 238.
15. Delay U., Nawarathne T., Dissanayake S. et al. Novel non-invasive in-house fabricated wearable system with a hybrid algorithm for fetal movement recognition. *PLoS One*. 2021;16(7):e0254560. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254560>.
16. Ghosh A.K., Catelli D.S., Wilson S. et al. Multi-modal detection of fetal movements using a wearable monitor. *Information Fusion*. 2024;103(C):120124. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102124>.
17. Маршалко Д.А., Кубанских О.В. Архитектура сверточных нейронных сетей. *Ученые записки Брянского государственного университета*. 2019;(4):10–3.
18. Layeghy S., Azemi G., Boashash B. Classification of fetal movement accelerometry through time-frequency features. Proceedings of the 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Australia: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2014.7021055>.

References:

1. Repina E.S., Kostyleva V., Bureeva A.Sh. et al. Modern possibilities of remote monitoring of fetal condition. [Sovremennye vozmozhnosti distantsionnogo monitorirovaniya sostoyaniya ploda]. *Mat' i ditya v Kuzbasse*. 2022;(4):12–7. (In Russ.).
2. Shulgin V.I., Antonchik O.N. The system for diagnosing the condition of the fetus and mother during pregnancy. [Sistema diagnostiki sostoyaniya ploda i materi v hode beremennosti]. *Vestnik Nacional' nogo tekhnicheskogo universiteta Har'kovskij politekhnicheskij institut. Seriya: informatika i modelirovanie*. 2016;(21):170–83. (In Russ.).
3. Yao Y., Ning Z., Zhang Q., Zhu T. Paris: Passive and continuous fetal heart monitoring system. (Q126840888). *Smart Health*. 2019;17:100087. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2019.100087>.
4. Wei J., Wang Z., Xing X. A wireless high-sensitivity fetal heart sound monitoring system. *Sensors*. 2021;21(1):193. <https://doi.org/10.3390/s21010193>.
5. Statnikov A., Aliferis C.F., Hardin D.P., Guyon I. A gentle introduction to support vector machines in biomedicine: volume 1: theory and methods. *World Scientific Publishing Co*, 2011. 183 p. <https://doi.org/10.1142/7922>.
6. Mhajna M., Schwartz N., Levit-Rosen L. et al. Wireless, remote solution for home fetal and maternal heart rate monitoring. *Am J Obstet Gynecol MFM*. 2020;2(2):100101. <https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2020.100101>.
7. ACOG Practice Bulletin No. 106: Intrapartum fetal heart rate monitoring: nomenclature, interpretation, and general management principles. *Obstet Gynecol*. 2009;114(1):192–202. <https://doi.org/10.1097/AOG.0b013e3181aef106>.
8. Zakaria N.D., Numan P.E., Malarvili M.B. Fetal movements recording system using accelerometer sensor. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(3):1022–32.
9. Qin M., Xu Y., Liang Y., Sun T. A wearable fetal movement detection system for pregnant women. *Front Med*. 2023;10:1160373. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1160373>.
10. Cai T.T., Wang L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2011;57(7):4680–8. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2146090>.
11. Zhao X., Zeng X., Koehl L. et al. Wearable system for in-home and long-term assessment of fetal movement. *IRBM*. 2019;41(4):205–11. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2019.11.003>.
12. Garcia-Breijo E., Garrigues J., Sanchez L., Laguarda-Miro N. An embedded simplified fuzzy ARTMAP implemented on a microcontroller for food classification. *Sensors*. 2013;13(8):10418–29. <https://doi.org/10.3390/s130810418>.
13. Altini M., Mullan P., Royackers M. et al. Detection of fetal kicks using wearable accelerometers during pregnancy: a trade-off between sensor number and placement. *Annu Inter Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2016;2016:5319–22. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591928>.
14. Arbuзов G.N., Sipovich A.S., Shobik I.P. Comparison of algorithms for processing the accelerometer signal used to determine the imbalance of the rotor in the balancing stand. Information Technologies and Systems 2023 (ITS 2023): proceedings of the International Scientific Conference. [Sravnenie algoritmov obrabotki signala akselerometra ispol'zuemogo dlya opredeleniya neuravnoveshebnosti rotora v stende balansirovki. Informacionnye tekhnologii i sistemy 2023 (ITS 2023): materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii]. *Minsk*, 2023. 238. (In Russ.).
15. Delay U., Nawarathne T., Dissanayake S. et al. Novel non-invasive in-house fabricated wearable system with a hybrid algorithm for fetal movement recognition. *PLoS One*. 2021;16(7):e0254560. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254560>.
16. Ghosh A.K., Catelli D.S., Wilson S. et al. Multi-modal detection of fetal movements using a wearable monitor. *Information Fusion*. 2024;103(C):120124. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102124>.
17. Marshalko D.A., Kubanski O.V. Convolutional neural network architecture. [Arhitektura svortchnykh nejronnykh setej]. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019;(4):10–3. (In Russ.).
18. Layeghy S., Azemi G., Boashash B. Classification of fetal movement accelerometry through time-frequency features. Proceedings of the 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Australia: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2014.7021055>.

Сведения об авторах / About the authors:

Ившин Александр Анатольевич, к.м.н. / **Alexandr A. Ivshin**, MD, PhD. E-mail: scipeople@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7834-096X>. Scopus Author ID: 610777. WoS ResearcherID: AAG-1507-2020. eLibrary SPIN-code: 8196-6605.

Воробьева Вера Михайловна, магистр / **Vera M. Vorobyova**, MSc. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6828-8117>. WoS ResearcherID: ACG-6668-2022.

Малышев Никита Андреевич, магистр / **Nikita A. Malyshev**, MSc.