УДК 615.471; 618-7
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.016

Раннее выявление нарушений двигательной активности плода: новое носимое устройство на основе пассивных датчиков

Н.А. Малышев✉

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация

Резюме. Непрерывный мониторинг двигательной активности плода является важным инструментом оценки его внутриутробного состояния. Традиционное ультразвуковое наблюдение не подходит для длительного домашнего использования, а субъективный метод материнского восприятия обладает низкой точностью. Акселерометрические системы рассматриваются как альтернатива, однако оптимальное количество датчиков и методы обработки сигналов остаются предметом исследований. Целью работы является разработать и валидировать носимое 4-канальное акселерометрическое устройство для регистрации шевелений плода на сроках гестации 26–40 недель. Устройство содержит четыре датчика LIS331DLH на базе микроконтроллера Raspberry Pi 4. Данные обрабатываются в среде SciLab. Проведено сравнительное исследование с участием 10 беременных женщин (26–40 недель). Референтные методы – ультразвуковое исследование (УЗИ) и субъективная регистрация матерью. Длительность каждой сессии составила 20 минут. По отношению к УЗИ (эталонный метод) совпадение детекций для субъективной материнской оценки составило 63,08 %, для разработанной акселерометрической системы – 92,31 %. Система показала высокую эффективность на всех сроках гестации, особенно, на поздних (40 недель). Предлагаемое устройство по точности значимо превосходит субъективный метод материнской оценки и сопоставимо с ультразвуковым исследованием, что делает его перспективным для домашнего скринингового мониторинга.

Ключевые слова: фетальный мониторинг, двигательная активность плода, функциональное состояние плода, пренатальная диагностика, носимое устройство, акселерометры, регистрация сигналов.

Для цитирования: Малышев Н.А. Раннее выявление нарушений двигательной активности плода: новое носимое устройство на основе пассивных датчиков. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(11). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2645 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.016

Early detection of fetal motor activity disorders: a novel wearable device based on passive sensors

N.A. Malyshev✉

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, the Russian Federation

Abstract. Continuous monitoring of fetal motor activity is an important tool for assessing intrauterine condition. Traditional ultrasound observation is unsuitable for long-term home use, while the subjective method of maternal perception has low accuracy. Accelerometer-based systems are considered an alternative; however, the optimal number of sensors and signal processing methods remain subjects of research. The aim of this work is to develop and validate a wearable 4-channel accelerometric device for recording fetal movements at gestational ages of 26–40 weeks. The device comprises four LIS331DLH sensors based on a Raspberry Pi 4 microcontroller. Data are processed in the SciLab environment. A comparative study was conducted involving 10 pregnant women (26–40 weeks). Reference methods were ultrasound examination (US) and subjective maternal registration. Each

© Малышев Н.А., 2026

session lasted 20 minutes. Relative to ultrasound (the gold standard), the detection agreement for subjective maternal assessment was 63.08 %, while for the developed accelerometric system it was 92.31 %. The system demonstrated high efficacy across all gestational ages, particularly at late stages (40 weeks). The proposed device significantly outperforms the subjective method of maternal assessment in accuracy and is comparable to ultrasound examination, making it promising for home-based screening monitoring.

Keywords: fetal monitoring, fetal motor activity, fetal functional state, prenatal diagnosis, wearable device, accelerometers, signal recording.

For citation: Malyshev N.A. Early detection of fetal motor activity disorders: a novel wearable device based on passive sensors. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2026;14(11). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2645 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.62.11.016

Введение

Двигательная активность (ДА) плода является одним из наиболее информативных маркеров его внутриутробного благополучия [1, 2]. Снижение или аномальный характер шевелений могут указывать на плацентарную недостаточность, гипоксию и повышают риск неблагоприятных неонатальных исходов [3]. Регулярный мониторинг ДА рекомендуется клиническими протоколами, однако его реализация сталкивается с методическими ограничениями.

«Золотым стандартом» оценки состояния плода остается ультразвуковое исследование и кардиотокография [4]. Эти методы требуют квалифицированного персонала, дорогостоящего оборудования и не подходят для длительного непрерывного наблюдения в домашних условиях. Наиболее доступной альтернативой является субъективная регистрация шевелений самой беременной [5]. Однако многочисленные исследования показывают, что точность материнского восприятия варьирует от 40 до 70 % в зависимости от срока гестации, массы тела матери и времени суток [6, 7].

В последние годы активно разрабатываются носимые акселерометрические системы[1] [8] для автоматической регистрации ДА плода [9, 10]. Такие датчики неинвазивны, безопасны, имеют низкую стоимость и могут интегрироваться в эластичный бандаж. В пилотных исследованиях показана принципиальная возможность детекции шевелений с помощью одного-двух акселерометров [8, 9]. Однако эти работы выявили ключевую проблему: низкое отношение сигнала и шума из-за большой площади брюшной стенки и вариабельности положения плода. Использование малого количества датчиков приводит к пропуску движений, происходящих в удаленных от него областях. На сегодняшний день остается неопределенным, какое минимальное количество акселерометров обеспечивает приемлемую точность детекции, сопоставимую с УЗИ.

Цель настоящей работы – разработать 4-канальное носимое акселерометрическое устройство для регистрации двигательной активности плода и оценить его точность в сравнении с ультразвуковым исследованием и субъективным методом материнской оценки на сроках гестации 26–40 недель.

Материалы и методы

Основные функциональные возможности предлагаемого устройства обеспечиваются за счет следующих составляющих частей:

1. Сенсорный модуль – четыре трехосевых акселерометра LIS331DLH (Troyka-модуль, Амперка, Россия). Диапазон измерений установлен в ±2g (чувствительность

[1] *Researches develop stick-on patch that monitors a baby's movements in utero.* Monash University. URL: https://www.monash.edu/news/articles/researchers-develop-stick-on-patch-that-monitors-a-babys-movements-in-utero (дата обращения: 01.12.2025).

$9{,}8\times10^{-3}$ м/с²). Частота дискретизации – 100 Гц. Питание 3,3 В от общего контроллера. Датчики закреплены на эластичном бандаже.

2. Центральный модуль – микроконтроллер Raspberry Pi 4 Model B (4 ГБ RAM, ОС Raspberry Pi OS). Сбор данных осуществляется по протоколу I2C (адреса датчиков заданы программно). Данные синхронизированы по системному времени модуля.

3. Модуль вывода – среда технических вычислений SciLab (v.2026 1.0), в которой реализованы сбор, визуализация и сохранение данных.

Четыре акселерометра фиксировались на передней брюшной стенке беременной в следующей топологии: Датчик 1 – область дна матки по средней линии; Датчик 2 – правая нижняя четверть (проекция спины плода при головном предлежании); Датчик 3 – левая нижняя четверть; Датчик 4 – область над лоном.

Расположение уточнялось врачом УЗИ перед каждым сеансом. Бандаж фиксировался с умеренным натяжением для минимизации артефактов от дыхания матери.

Сигналы с каждого датчика обрабатывались по оси Z (перпендикулярно брюшной стенке). Дополнительно вычислялась векторная сумма модулей ускорений по трем осям. Для извлечения информативных признаков жизнедеятельности плода исходные сигналы подвергаются обработке с помощью комбинации математических алгоритмов. Для обработки сигналов, зарегистрированных с помощью акселерометров, последовательно применяются: фильтр высоких частот Баттерворта [11] с частотой среза 2 Гц для устранения низкочастотных компонент сигнала, модуляция и сглаживание скользящим средним для удобства поиска пиков в двуполярном сигнале. Два последовательных превышения порога с интервалом менее 2 с считались одним движением. Порог выбран эмпирически на основе анализа спектральной плотности сигналов шевелений плода в диапазоне 1–4 Гц.

На Рисунке 1 показана блок-схема, разработанная для отображения в SciLab. Исполнение программы начинается с инициализации порта I2C и получения адресов для каждого из акселерометров, с последующей проверкой при обращении к каждому из датчиков. Если все датчики исправны и работают, то происходит запись данных. По окончанию записи, данные сохраняются и отображаются в виде графика, как показано на Рисунке 2.

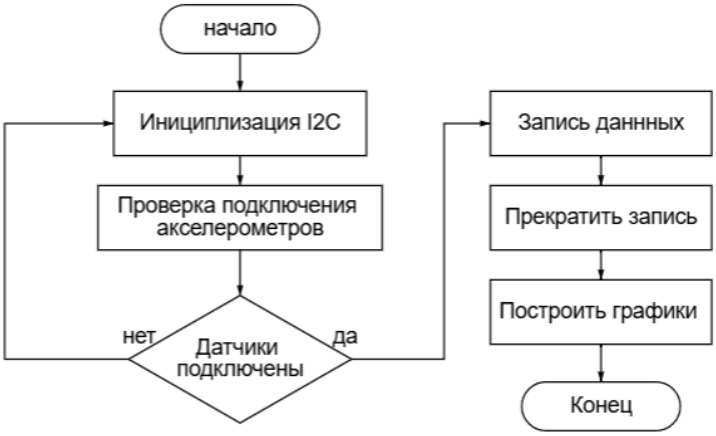


Рисунок 1 – Блок схема модуля вывода, реализованного в SciLab
Figure 1 – Block diagram of the output module implemented in SciLab

На Рисунке 2 показаны графики всех четырех датчиков по оси Z, на графиках можно увидеть характерные пики, соответствующие фиксации двигательной активности плода.

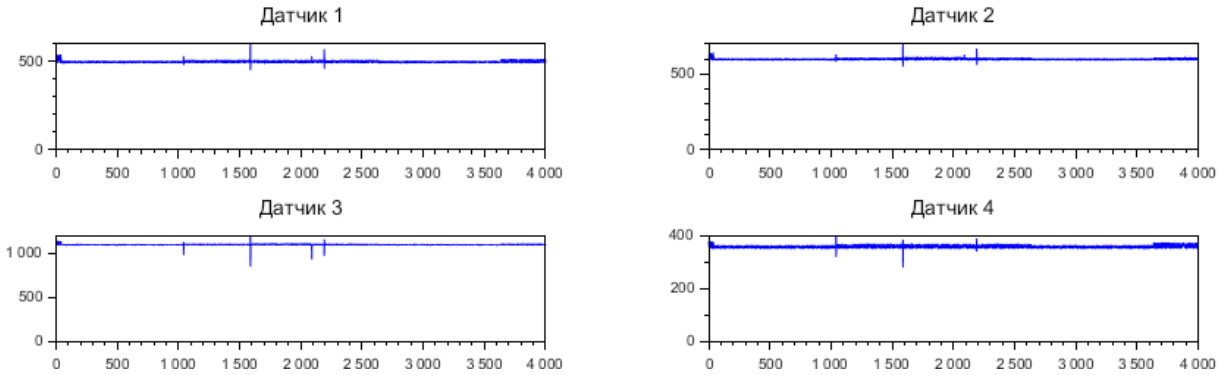


Рисунок 2 – Графики полученных данных по оси Z
Figure 2 – Plots of data obtained along the Z-axis

Для тестирования экспериментального носимого устройства для регистрации сигналов двигательной и сердечной активности плода были выбраны 10 беременных женщин, находящихся на различных сроках гестации: от 26 до 40 недель беременности. Перед тестированием каждая женщина была ознакомлена с целью исследования, его методикой, после чего ими было оформлено информированное добровольное согласие. Согласно [12], основанному на аналогичном исследовании, среднее время записи составило 23,5 минуты. В данном исследовании для записи данных было использовано 20 минут, учитывая тот факт, что испытуемые могут испытывать некоторый дискомфорт, если будет использовано слишком много времени. Технологическая схема экспериментальной процедуры показана на Рисунке 3.

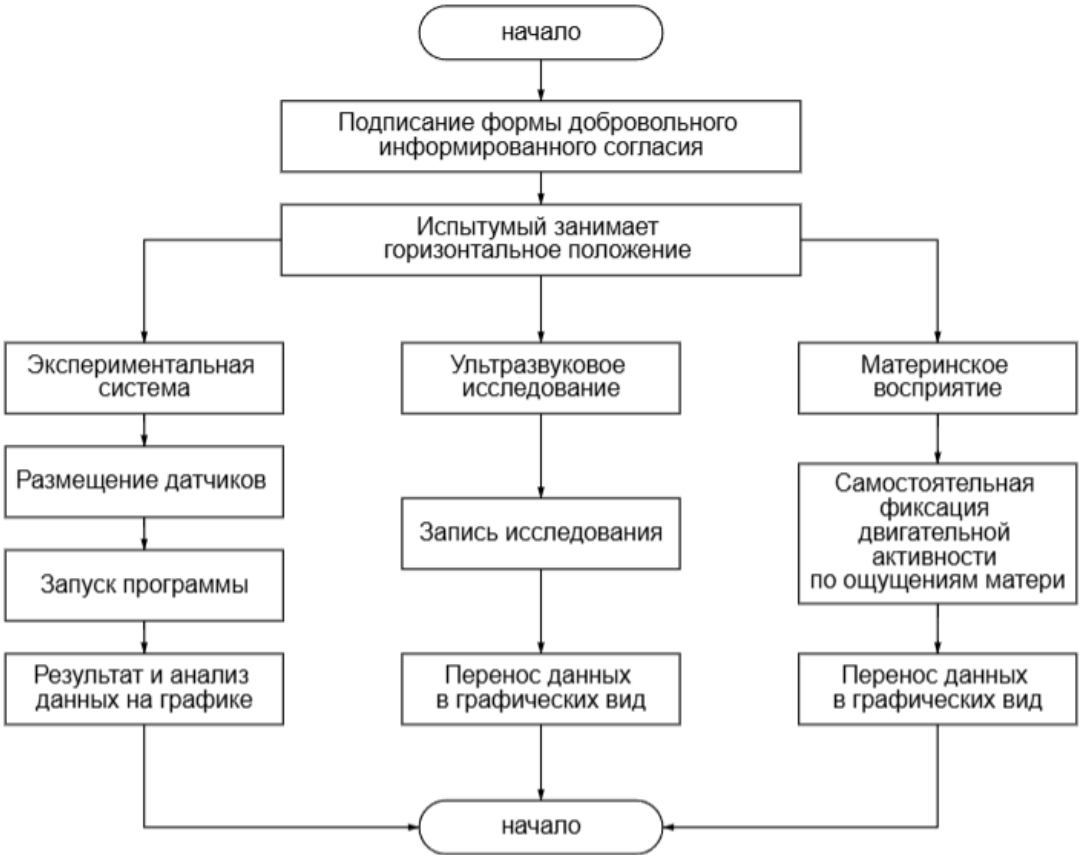


Рисунок 3 – Технологическая схема экспериментальной процедуры
Figure 3 – Process flow diagram of the experimental procedure

Синхронизация обеспечивалась единым системным временем Raspberry Pi и ручной меткой в начале записи. Совпадением детекций считалась регистрация движения в трех методах с допуском по времени в 1 с.

Результаты и обсуждение

В исследование включено 10 беременных с различным сроком гестации от 26 до 40 недель, средний возраст составил 29 лет. Критерии включения: одноплодная беременность, головное предлежание, отсутствие тяжелой соматической патологии. Для каждой женщины подсчитано количество движений плода (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты детекции движений плода
Table 1 – Results of fetal movement detection

Срок беременности (нед.)	Количество зафиксированных движений			Совпадение матери с УЗИ (%)	Совпадение системы с УЗИ (%)
	УЗИ	Материнское восприятие	Акселерометрическая система		
26	4	3	3	75	75
28	5	3	4	60	80
31	7	4	7	57,14	100
33	5	3	4	60	80
34	7	4	6	57,14	85,71
35	8	5	8	62,50	100
36	4	2	4	50	100
37	9	5	8	55,56	88,89
38	8	7	8	87,50	100
40	8	5	8	62,50	100
	65	**41**	**60**	**63,08**	**92,31**

Для более информативного сравнения, ниже представлены объединенные графики по 3 методам на беременных с ранним сроком гестации (26 недель) и более поздним (40 недель).

На Рисунке 4 представлены графики результата эксперимента, проведенного на раннем сроке беременности с использованием трех различных методов; техника материнского восприятия (синий цвет), ультразвук (красный цвет) и предлагаемая система регистрации (зеленый цвет).

Как видно из результатов, представленных на Рисунке 4, техника материнского восприятия показывает 3 движения на этом сеансе. Ультразвуковой метод зафиксировал 2 небольших движения и 2 сильных толчка. Система регистрации успешно зафиксировала 3 движения. В результате также отображается движение, воспринимаемое матерью, в то время как ультразвук и экспериментальная система не показывают никаких движений. Такой сценарий движения известен как ложное активное движение.



Рисунок 4 – Зафиксированные данные в эксперименте (беременная на 26-й неделе гестации): красный цвет – ультразвуковое исследование; синий – материнское восприятие; зеленый – экспериментальное устройство
Figure 4 – Data recorded during the experiment (a pregnant woman at 26 weeks' gestation): red – ultrasound; blue – maternal perception; green – the experimental device

На Рисунке 5 показана следующая запись, уже на 40 неделе гестации, на графиках видно значительно большее количество зафиксированных движений, что обусловливается сроком. В этот раз все движения, в том числе с малой интенсивностью зафиксированные УЗИ, были зафиксированы и экспериментальным устройством. Мать же смогла почувствовать только 5 из 8 движений.

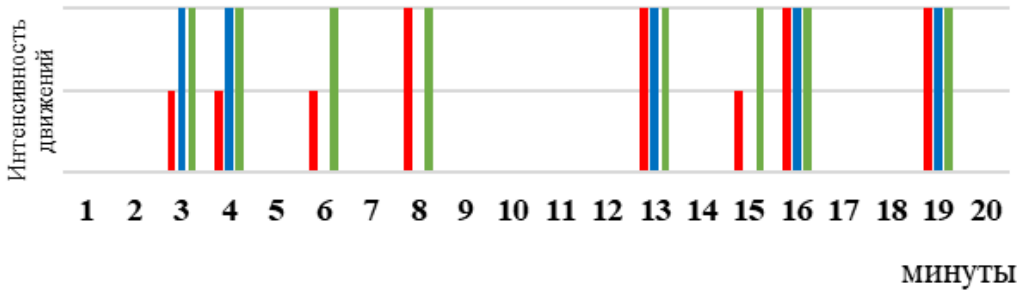


Рисунок 5 – Зафиксированные данные в эксперименте (беременная на 40-й неделе гестации): красный цвет – ультразвуковое исследование; синий – материнское восприятие; зеленый – экспериментальное устройство
Figure 5 – Data recorded during the experiment (a pregnant woman at 40 weeks' gestation): red – ultrasound; blue – maternal perception; green – the experimental device

Данные по двум проведенным экспериментам показывают, что предлагаемая система дает крайне высокие результаты на более поздних сроках беременности, но также является более достоверным относительно материнского восприятия на ранних сроках.

Заключение

Стандартизировано, что двигательная активность измеряется с помощью метода материнского восприятия. Сегодня у большинства матерей довольно напряженный период вынашивания ребенка. Они заняты в течение дня и не часто обращают внимание на своего плода. Возвращаясь с работы, они чувствуют себя слишком уставшими к вечеру. Таким образом, возникает необходимость в разработке точной системы для мониторинга двигательной активности в течение длительного периода времени. Мониторинг двигательной активности позволяет матерям и врачам прогнозировать состояние и развитие плода. Это исследование помогает в разработке инструментов, которые облегчат их жизнь за счет мониторинга состояния плода. В этой статье были представлены первые результаты работы экспериментальное устройства на основе

акселерометра, способного фиксировать двигательную активность плода на различных сроках беременности.

Первоначальные результаты показывают, что этот метод более эффективен при обнаружении двигательной активности, чем при восприятии матерью. Было установлено, что предлагаемое устройство способно выявлять эпизоды активности плода и эпизоды его бездействия, для метода материнского восприятия с точностью в 63,08 %, для предложенной акселерометрической системы – 92,31 %, относительно ультразвукового исследования. В частности, система продемонстрировала хороший уровень эффективности обнаружения на более поздних сроках гестации.

В дальнейшем устройство будет доработано, в частности, усовершенствованы алгоритмы обработки данных и добавлены датчики высокочувствительных микрофонов для возможности регистрации частоты сердечных сокращений помимо двигательной активности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Репина Е.С., Костелей Я.В., Буреев А.Ш., Жданов Д.С., Юрьев С.Ю. Современные возможности дистанционного мониторирования состояния плода. *Мать и дитя в Кузбассе.* 2022;(4):12–17. https://doi.org/10.24412/2686-7338-2022-4-12-17
   Repina E.S., Kosteley Ya.V., Bureev A.Sh., Zhdanov D.S., Yuriev S.Yu. Modern possibilities of remote monitoring of fetal condition. *Mother and Baby in Kuzbass.* 2022;(4):12–17. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2686-7338-2022-4-12-17
2. Lai J., Nowlan N.C., Vaidyanathan R., Shaw C.J., Lees C. Fetal movements as a predictor of health. *Acta obstetricia et Gynecologica Scandinavica.* 2016;95(9):968–975. https://doi.org/10.1111/aogs.12944
3. Scher M.S., Eyre H., Donn S., et al. An interdisciplinary fetal neonatal neurology collaborative promotes integrative life-course brain health. *Frontiers in Neurology.* 2026;16:1725289. https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1725289
4. Репина Е.С., Костелей Я.В., Буреев А.Ш. и др. Мониторирование внутриутробного состояния плода. История вопроса. Новые возможности фонокардиографии. *Бюллетень сибирской медицины.* 2023;22(3):141–149. https://doi.org/10.20538/1682-0363-2023-3-141-149
   Repina E.S., Kosteley Y.V., Bureev A.Sh., et al. Monitoring of the intrauterine state of the fetus. Question history. New possibilities of phonocardiography. *Bulletin of Siberian Medicine.* 2023;22(3):141–149. https://doi.org/10.20538/1682-0363-2023-3-141-149
5. De Vries J.I.P., Visser G.H.A., Prechtl H.F.R. The emergence of fetal behaviour. I. Qualitative aspects. *Early Human Development.* 1982;7(4):301–322. https://doi.org/10.1016/0378-3782(82)90033-0
6. Winje B.A., Saastad E., Gunnes N., et al. Analysis of ‘count-to-ten’ fetal movement charts: a prospective cohort study. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology.* 2011;118(10):1229–1238. https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.2011.02993.x
7. Khlif M.S.H., Boashash B., Layeghy S., Ben-Jabeur T., Colditz P.B., East Ch. A passive DSP approach to fetal movement detection for monitoring fetal health. In: *2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA), 02–05 July 2012, Montreal, QC, Canada*. IEEE; 2012. P. 71–76. https://doi.org/10.1109/ISSPA.2012.6310647

8. Layeghy S., Azemi Gh., Colditz P., Boashash B. Classification of fetal movement accelerometry through time-frequency features. In: *2024 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 15–17 December 2014, Gold Coast, QLD, Australia.* IEEE; 2014. https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2014.7021055
9. Ghosh A.K., Catelli D.S., Wilson S., Nowlan N.C., Vaidyanathan R. Multi-modal detection of Fetal Movements Using a Wearable Monitor. *Information Fusion.* 2024;103:102124. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102124
10. Mesbah M., Khlif M.S., Layeghy S., et al. Automatic fetal movement recognition from multi-channel accelerometry data. *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* 2021;210:106377. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106377
11. Сорокин Г.А. Фильтры нижних частот. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* 2015;15(1):100–107.
Sorokin G.A. Filters of the lower frequencies. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technology, Automatic Control, Radioelectronics.* 2015;15(1):100–107. (In Russ.).
12. Boashash B., Khlif M.S., Ben-Jabeur T., East C.E., Colditz P.B. Passive detection of accelerometer-recorded fetal movements using a time-frequency signal processing approach. *Digital Signal Processing.* 2014;25:134–155. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.10.002

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Малышев Никита Андреевич, преподаватель кафедры семейной медицины, общественного здоровья, организации здравоохранения, безопасности жизнедеятельности, медицины катастроф, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация.
e-mail: malsyhev.nikita.2016@gmail.com
ORCID: 0009-0005-2722-5976

Nikita A. Malyshev, Lecturer at the Department of Family Medicine, Public Health, Health Care Organization, Occupational Safety, and Disaster Medicine, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 15.09.2026; одобрена после рецензирования 11.11.2026; принята к публикации 25.11.2026.

The article was submitted 15.09.2026; approved after reviewing 11.11.2026; accepted for publication 25.11.2026.