
DOI: 10.63527/1607-8829-2025-4-93-104

Кобилянський Р.Р.^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-4664-3162>),
Юрик О.Є.^{1,3} (<https://orcid.org/0000-0003-2245-9333>),
Бухараєва Н.Р.¹ (<https://orcid.org/0009-0007-9310-2186>),
Кобилянська А.К.¹ (<https://orcid.org/0009-0007-5483-7614>),
Бойчук В.В.^{1,2} (<https://orcid.org/0009-0006-7852-3452>)

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет, ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна;

³ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ, Україна

Автор-кореспондент: Кобилянський Р.Р., e-mail: romakobylianskyi@ukr.net

Термоелектричний тепломір для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок та хребта

У роботі представлено розробку багатоканального портативного термоелектричного тепломіра з безпроводним інтерфейсом та кросплатформеним програмним забезпеченням для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок та хребта людини. Прилад забезпечує одночасне вимірювання температури та густини теплового потоку чотирма незалежними каналами з можливістю підключення через Bluetooth або Wi-Fi інтерфейс. Розроблено програмне забезпечення на базі React Native, що працює на платформах Windows, macOS, Android та iOS з функціями керування пацієнтами, реал-тайм моніторингу, збереження даних у хмарній базі Firebase та можливістю аналізу зібраних датасетів методами машинного навчання.

Ключові слова: термоелектричний тепломір, напівпровідниковий сенсор, термоелектричний матеріал на основі телуриду вісмуту, густина теплового потоку, температура, медична діагностика, нейротрофічні ушкодження, травми нижніх кінцівок та хребта, комп'ютерна програма, безпроводний інтерфейс, React Native, Firebase, машинне навчання.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Нейротрофічні ушкодження нижніх кінцівок та хребта є однією з актуальних проблем сучасної медицини, що зумовлено широкою

Цитування: Кобилянський Р.Р., Юрик О.Є., Бухараєва Н.Р., Кобилянська А.К., Бойчук В.В. (2025). Термоелектричний тепломір для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок та хребта. Термоелектрика, (4), 97–108. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-4-93-104>

розповсюдженістю патології та складністю ранньої діагностики. Діабетична нейропатія, радикулопатія, поліневропатія та інші нейротрофічні захворювання призводять до порушення іннервації біологічних тканин, що супроводжується змінами локального тепловиділення та температурних характеристик уражених ділянок [1–8]. Своєчасна діагностика таких порушень дозволяє запобігти розвитку ускладнень, включаючи трофічні виразки, гангрену та інвалідизацію пацієнтів [1, 4, 5].

Традиційні методи діагностики нейротрофічних ушкоджень, такі як електронеуроміографія, ультразвукове дослідження та магнітно-резонансна томографія, хоча і є інформативними, проте мають ряд обмежень: висока вартість обладнання, необхідність спеціалізованих приміщень, складність проведення масових обстежень та неможливість тривалого моніторингу стану пацієнта в динаміці [3–5].

Напівпровідникові термоелектричні сенсори теплового потоку [2, 6–15] є ефективним інструментом для вивчення локальних теплових характеристик тіла людини завдяки компактним розмірам, високій чутливості, стабільній роботі в широкому температурному діапазоні та сумісності з сучасними системами реєстрації даних [2, 11, 12].

Сучасний розвиток інформаційних технологій відкриває нові можливості для медичної діагностики. Використання безпроводних інтерфейсів (Bluetooth, Wi-Fi) дозволяє створювати мобільні діагностичні системи, а застосування хмарних технологій та методів машинного навчання забезпечує можливість накопичення великих обсягів даних та їх інтелектуального аналізу [16–20].

Тому *метою роботи* є розробка багатоканального портативного термоелектричного тепломіра з безпроводним інтерфейсом та кросплатформеним програмним забезпеченням для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок та хребта.

1. Конструкція і технічні характеристики приладу

Розроблений в Інституті термоелектрики НАН і МОН України багатоканальний портативний термоелектричний тепломір (рис. 1) забезпечує одночасне вимірювання температури та густини теплового потоку з передачею даних через безпроводний інтерфейс. Основні технічні параметри приладу представлені в таблиці 1.

Прилад містить блок керування з вбудованим мікроконтролером, чотири термоелектричні сенсори температури і теплового потоку та модуль безпроводного зв'язку. Кожен термоелектричний сенсор складається з датчика температури на основі термістора та датчика теплового потоку на основі термопарної термоелектричної батареї. Термістор має габаритні розміри $2.2 \times 2 \times 0.7$ мм, що забезпечує високу локальність вимірювання температури. Термоелектрична батарея розміром $10 \times 10 \times 3$ мм виготовлена з напівпровідникових термоелектричних матеріалів на основі телуриду вісмуту та забезпечує високу чутливість до теплового потоку в діапазоні від 1 до 100 мВт/см².



Рис. 1. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і теплових потоків

Таблиця 1

Технічні характеристики приладу

№	Технічні характеристики приладу	Значення параметрів
1.	Кількість вимірювальних каналів	4
2.	Діапазон робочих температур	0 ÷ +50 °С
3.	Точність вимірювання температури	± 0.05 °С
4.	Діапазон вимірювання густини теплового потоку	1 ÷ 100 мВт/см ²
5.	Максимальна похибка вимірювання густини теплового потоку	3 %
6.	Габаритні розміри термоелектричного сенсора	(14×14×3) мм
7.	Безпроводний інтерфейс	Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11 b/g/n
8.	Дальність зв'язку	до 10 м (Bluetooth), до 50 м (Wi-Fi)
9.	Частота вимірювань	2 вимірювання/с
10.	Час неперервної роботи приладу	24 год

Вимірювання температури та густини теплового потоку відбувається одночасно 4-ма термоелектричними сенсорами з передачею результатів вимірювання через Bluetooth або Wi-Fi інтерфейс на мобільний пристрій або персональний комп'ютер для обробки, візуалізації та збереження в хмарній базі даних Firebase в реальному часі

(рис. 2). Електричні сигнали від термоелектричних сенсорів підсилюються та оцифровуються за допомогою 16-бітного аналого-цифрового перетворювача з частотою дискретизації 2 вимірювання за секунду. Мікроконтролер здійснює первинну обробку сигналів, калібрування та перетворення в одиниці температури ($^{\circ}\text{C}$) та густини теплового потоку ($\text{мВт}/\text{см}^2$).

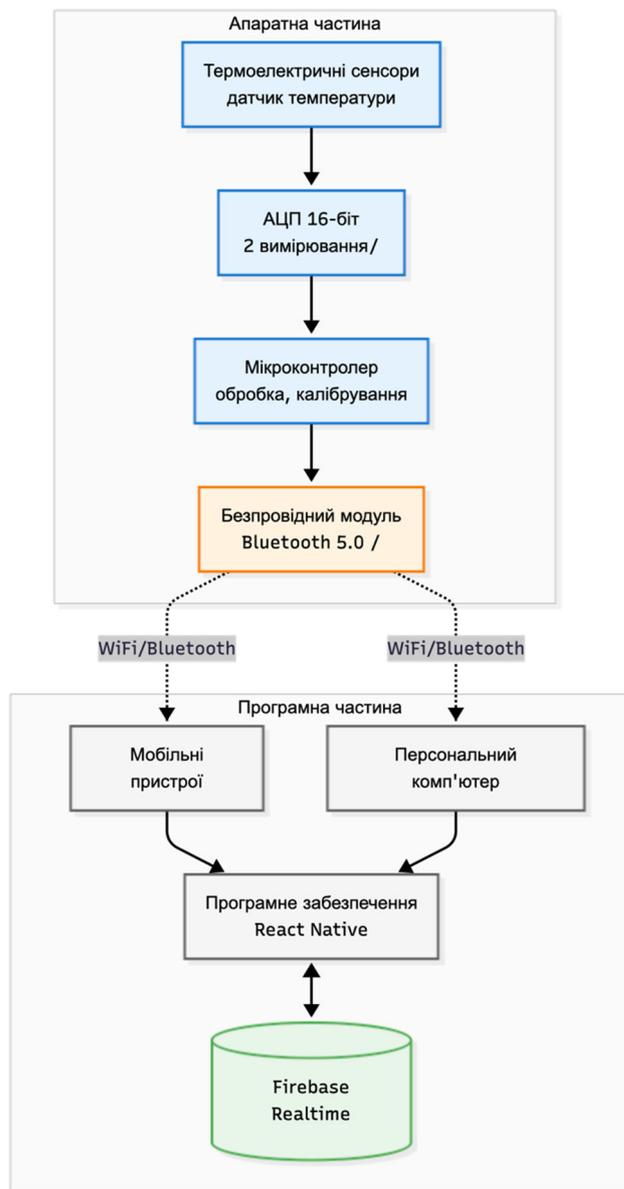


Рис.2. Структурна схема термоелектричного тепломіра з безпроводним інтерфейсом

Використання безпроводного інтерфейсу забезпечує ряд переваг порівняно з традиційними дротовими системами. По-перше, можливість проведення вимірювань без обмеження рухливості пацієнта дозволяє здійснювати функціональні тести з навантаженням, що є важливим для діагностики нейротрофічних ушкоджень при різних положеннях тіла та рівнях фізичної активності. По-друге, відсутність проводів підвищує комфорт пацієнта під час тривалих сесій моніторингу, що може тривати від кількох

хвилин до кількох годин. По-третє, можливість одночасного моніторингу кількох пацієнтів з одного робочого місця підвищує ефективність роботи медичного персоналу при проведенні масових профілактичних обстежень. По-четверте, використання різних пристроїв (смартфони, планшети, ноутбуки) для отримання та аналізу даних забезпечує гнучкість системи та можливість її застосування в різних умовах – від стаціонару до виїзних медичних бригад.

Живлення приладу здійснюється від вбудованого літій-іонного акумулятора ємністю 2000 мА·год, що забезпечує безперервну роботу протягом 24 годин при частоті вимірювань 2 рази на секунду. Прилад обладнано індикатором рівня заряду батареї та системою автоматичного відключення при критично низькому заряді для запобігання пошкодженню акумулятора.

Прилад підтримує два режими роботи: автономний та з підключенням до мобільного пристрою або комп'ютера. В автономному режимі вимірювання можна проводити незалежно від програмного забезпечення, використовуючи вбудований інтерфейс приладу з кнопками керування та невеликим дисплеєм для відображення поточних значень температури та густини теплового потоку. Результати вимірювань автоматично зберігаються у внутрішній пам'яті приладу, що дозволяє записати до 50 годин безперервних вимірювань. Це особливо зручно для тривалого моніторингу пацієнта в польових умовах або при відсутності доступу до мобільного пристрою. У режимі з підключенням через Bluetooth або Wi-Fi прилад передає дані в реальному часі на смартфон, планшет або персональний комп'ютер, де програмне забезпечення забезпечує розширену візуалізацію, аналіз та зберігання даних у хмарній базі Firebase. Збережені в пам'яті приладу дані можуть бути згодом завантажені в програму для подальшого аналізу та архівування.

2. Опис комп'ютерної програми приладу

Програмне забезпечення для термоелектричного тепломіра (рис. 3) розроблено на базі фреймворку React Native, що забезпечує кросплатформеність та можливість роботи на операційних системах Windows, macOS, Android та iOS без необхідності розробки окремих версій для кожної платформи [21–23]. Архітектура програми побудована за принципом клієнт-серверної взаємодії з використанням хмарної бази даних Firebase Realtime Database для зберігання та синхронізації даних між пристроями в реальному часі [24–26].

Програма забезпечує повний цикл роботи з пацієнтами від створення профілю до збереження результатів обстеження. При першому запуску користувач проходить процедуру автентифікації з використанням Firebase Authentication, що підтримує вхід через email/пароль або Google Sign-In. Кожен користувач має власний обліковий запис з персональними налаштуваннями та доступом тільки до своїх даних, що відповідає вимогам медичної етики та захисту персональних даних [20–22].



Рис. 3. Інтерфейс модуля керування пацієнтами

Після автентифікації користувач має можливість створювати профілі пацієнтів з детальною інформацією: прізвище, ім'я, по батькові, вік, стать, основний діагноз та примітки про характер ушкодження. Для пацієнтів з нейроτροφічними ушкодженнями передбачено можливість вказати локалізацію ураження (ліва або права нога, поперековий або грудний відділ хребта), ступінь ураження, інтенсивність больового синдрому, порушення чутливості та рухові розлади. Всі дані пацієнтів зберігаються в структурованому вигляді в хмарній базі даних з повною ізоляцією між користувачами.

Для проведення вимірювань користувач обирає пацієнта зі списку та встановлює з'єднання з термоелектричним тепломіром через Bluetooth або Wi-Fi інтерфейс. Програма автоматично виявляє доступні пристрої в радіусі дії та встановлює з'єднання після підтвердження користувачем. Під час вимірювання дані з чотирьох каналів відображаються на екрані у вигляді інтерактивних графіків в реальному часі (рис. 4). Користувач може вибирати окремі канали для детального перегляду, змінювати масштаб графіків та спостерігати за поточними значеннями температури і густини теплового потоку, а також за статистичними показниками (мінімальне, максимальне та середнє значення) для кожного каналу.

Під час проведення вимірювань дані накопичуються локально на пристрої з частотою 2 вимірювання за секунду. Після завершення сесії вимірювань користувач має можливість зберегти всі зібрані дані одним пакетом до хмарної бази даних Firebase. Кожна збережена сесія містить метадані (ідентифікатор користувача, ідентифікатор пацієнта, ім'я пацієнта, діагноз, час початку та завершення вимірювання, тип підключення), повний масив вимірювань з позначками часу та розраховану статистику для кожного каналу. Така структура зберігання мінімізує кількість операцій запису до бази даних, що знижує вартість використання хмарних сервісів та забезпечує збереження цілісності даних сесії.

Крім збереження в хмарній базі даних, програма надає можливість експортувати зібрані дані у форматі CSV для подальшого аналізу в спеціалізованих програмах обробки даних (Microsoft Excel, MATLAB, Python тощо). Експортовані файли містять повну інформацію про пацієнта, параметри вимірювання та всі зареєстровані значення, що

дозволяє проводити детальний статистичний аналіз та порівняння результатів різних сесій вимірювань.

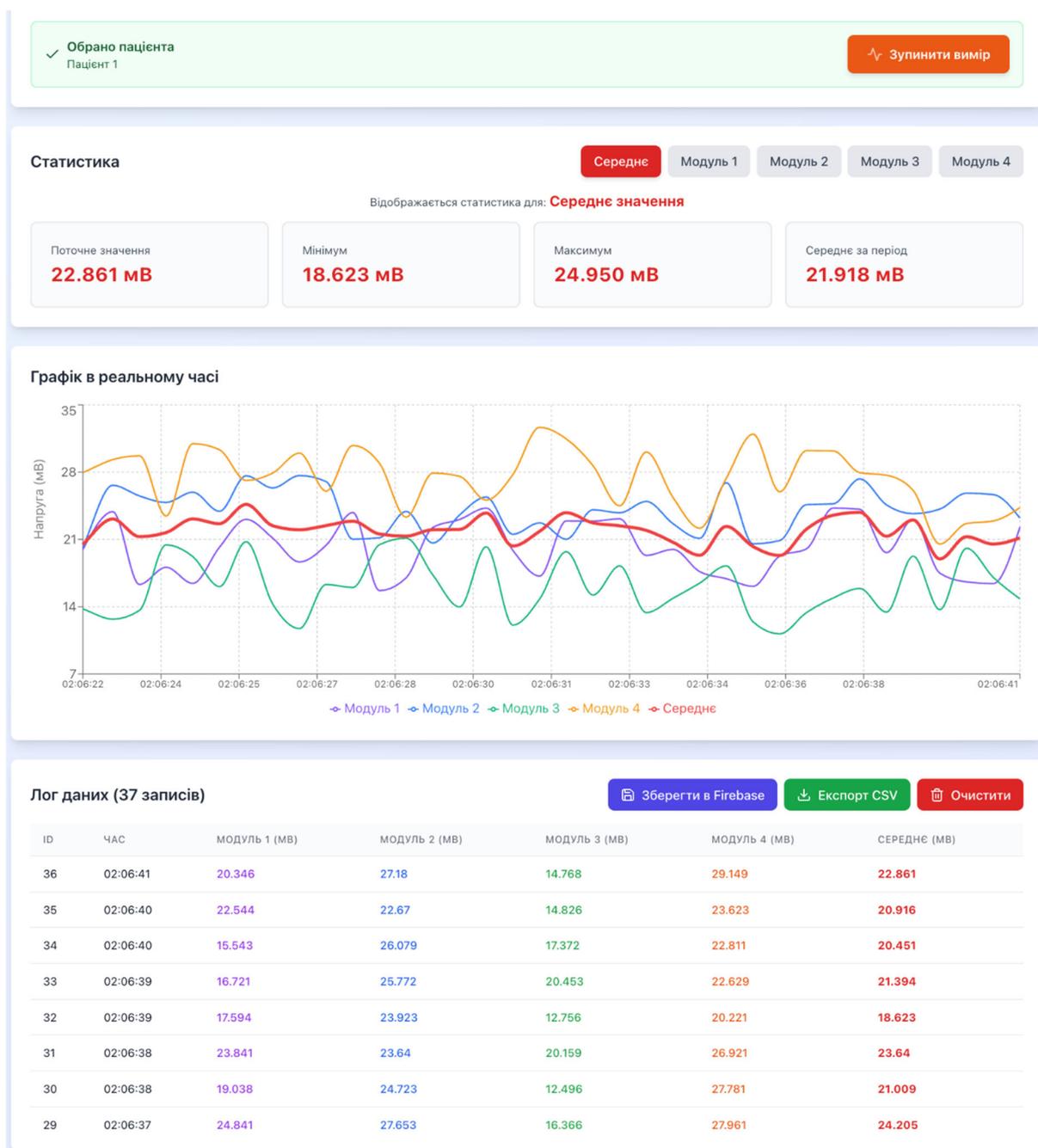


Рис. 4. Інтерфейс програми для моніторингу та збереження результатів вимірювань (відображається реал-тайм графік з активних каналів вимірювання та статистика)

3. Методика проведення вимірювань та аналіз даних

Методика проведення вимірювань з використанням розробленого комплексу включає кілька послідовних етапів. На підготовчому етапі медичний працівник створює профіль пацієнта в програмному забезпеченні, вносячи основні дані (ПІБ, вік, стать) та детальну інформацію про характер нейротрофічного ушкодження. Для пацієнтів з

діабетичною нейропатією вказується стаж захворювання на цукровий діабет, рівень глікемії, наявність супутніх ускладнень (ретинопатія, нефропатія, ангіопатія тощо). Для пацієнтів з радикулопатією фіксується локалізація ураження (L4, L5, S1), інтенсивність больового синдрому за візуально-аналоговою шкалою, тривалість захворювання. Така детальна документація дозволяє в подальшому проводити статистичний аналіз даних з урахуванням клінічних особливостей пацієнтів.

Вимірювання рекомендується проводити в стандартизованих умовах при температурі приміщення 22 ± 2 °C та відносній вологості 40–60 %. Пацієнт повинен перебувати в стані спокою не менше 15 хвилин до початку вимірювання для досягнення теплової рівноваги організму з навколишнім середовищем. Термоелектричні сенсори встановлюються на досліджувані ділянки тіла за допомогою еластичних фіксаторів, що забезпечують рівномірний контакт сенсора з поверхнею шкіри без надмірного тиску. Для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок рекомендується симетричне розміщення сенсорів на обидві кінцівки в проекції підшовної поверхні стопи та литкових м'язів, що дозволяє виявляти асиметрію тепловиділення між здоровою та ураженою кінцівкою.

Після встановлення сенсорів та підключення приладу через Bluetooth або Wi-Fi інтерфейс медичний працівник ініціює сесію вимірювань в програмному забезпеченні. Протягом перших 2–3 хвилин відбувається процес теплової адаптації сенсорів до температури поверхні шкіри, що супроводжується поступовою стабілізацією показників на графіках. Після досягнення стабільного стану починається основна фаза вимірювань тривалістю 5–10 хвилин, протягом якої реєструються температура та густина теплового потоку з частотою 2 вимірювання за секунду. Така висока частота дискретизації дозволяє виявляти короточасні флуктуації тепловиділення, пов'язані з пульсацією крові в поверхневих судинах, що може мати додаткове діагностичне значення при оцінці стану мікроциркуляції.

Програмне забезпечення в реальному часі відображає графіки зміни температури та густини теплового потоку для кожного з чотирьох каналів, а також розраховує середнє значення, мінімум, максимум та стандартне відхилення. Користувач може вибирати окремі канали для детального перегляду, змінювати масштаб графіків та додавати текстові примітки до сесії вимірювань. Після завершення вимірювання всі дані зберігаються в хмарній базі Firebase з прив'язкою до конкретного пацієнта, що дозволяє в подальшому відстежувати динаміку змін показників при повторних обстеженнях.

Аналіз зібраних даних включає кілька рівнів. На першому рівні проводиться порівняння абсолютних значень температури та густини теплового потоку з референтними значеннями для здорових осіб відповідного віку та статі. Зниження температури поверхні стопи нижче 30 °C та густини теплового потоку нижче 15 мВт/см² може свідчити про порушення кровопостачання та іннервації біологічних тканин. На другому рівні аналізується асиметрія показників між симетричними ділянками лівої та правої кінцівок. Різниця більше 10 % вважається патологічною та вказує на односторонній характер ураження. На третьому рівні оцінюється динаміка змін

показників при повторних обстеженнях, що дозволяє контролювати ефективність лікування та прогресування захворювання.

Експорт даних у форматі CSV дозволяє проводити поглиблений статистичний аналіз з використанням спеціалізованих програмних пакетів. Дослідники можуть застосовувати методи кореляційного аналізу для виявлення зв'язків між показниками тепловиділення та клінічними характеристиками пацієнтів, методи дисперсійного аналізу для порівняння груп пацієнтів з різними типами нейротрофічних ушкоджень, методи регресійного аналізу для побудови прогностичних моделей розвитку ускладнень. Накопичення великих масивів даних створює передумови для застосування методів машинного навчання з метою автоматизації діагностичного процесу та підвищення точності виявлення ранніх стадій нейротрофічних ушкоджень.

Висновки

1. Розроблено багатоканальний портативний термоелектричний тепломір з безпроводним інтерфейсом для діагностики нейротрофічних ушкоджень нижніх кінцівок та хребта, що забезпечує одночасне вимірювання температури з точністю ± 0.05 °C та густини теплового потоку в діапазоні 1–100 мВт/см² з похибкою 3 % чотирма незалежними каналами. Використання Bluetooth 5.0 та Wi-Fi 802.11 b/g/n інтерфейсів дозволяє проводити вимірювання без обмеження рухливості пацієнта на відстані до 10 м та 50 м відповідно.
2. Створено кросплатформене програмне забезпечення на базі React Native, що працює на операційних системах Windows, macOS, Android та iOS з функціями керування пацієнтами, реал-тайм моніторингу та збереження даних у хмарній базі Firebase Realtime Database. Комп'ютерна програма забезпечує повний цикл роботи від створення профілю пацієнта з детальною інформацією про локалізацію та характер нейротрофічного ушкодження до збереження результатів обстеження та їх експорту для подальшого аналізу.
3. Розроблено методику проведення медичних вимірювань з використанням чотирьох термоелектричних сенсорів, що включає стандартизовані умови вимірювання (температура приміщення 22 ± 2 °C, відносна вологість 40–60 %), симетричне розміщення сенсорів на досліджуваних ділянках нижніх кінцівок, час теплової адаптації 2–3 хвилини та тривалість основної фази вимірювання 5–10 хвилин. Запропоновано багаторівневий підхід до аналізу даних, що включає порівняння абсолютних значень з референтними, оцінку асиметрії між симетричними ділянками та аналіз динаміки змін при повторних обстеженнях.
4. Запропоновано структуру зберігання даних з прив'язкою сесій вимірювань до конкретних пацієнтів та забезпеченням повної ізоляції даних між користувачами відповідно до медичних етичних норм та вимог захисту персональних даних. Накопичення великих обсягів структурованих даних у хмарній базі Firebase створює передумови для застосування методів машинного навчання (Random Forest, Support Vector Machines, нейронні мережі) з метою класифікації типів нейротрофічних

ушкоджень, прогнозування розвитку ускладнень, персоналізованої діагностики та автоматичного виявлення аномалій, що може підвищити точність та швидкість медичної діагностики.

5. Розроблений комплекс (прилад + програмне забезпечення) є перспективним для впровадження в клінічну практику для ранньої діагностики нейротрофічних ушкоджень, об'єктивізації діагнозу, моніторингу ефективності лікування в динаміці та проведення масових профілактичних обстежень пацієнтів групи ризику (хворі на цукровий діабет, остеохондроз, васкулярні захворювання тощо). Безпровідний інтерфейс та кросплатформеність програмного забезпечення забезпечують можливість використання системи як в умовах стаціонару, так і в амбулаторній практиці та виїзними медичними бригадами. Експорт даних у форматі CSV дозволяє проводити поглиблений статистичний аналіз з використанням спеціалізованих програмних пакетів для наукових досліджень.

Інформація про авторів

Кобилянський Р.Р. – Кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри термоелектрики та медичної фізики.

Юрик О.Є. – Завідувач лабораторії (лабораторії нейроортопедії та проблем болю) Інституту травматології та ортопедії Національної академії медичних наук України.

Бухарасва Н.Р. – Провідний інженер.

Кобилянська А.К. – Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Бойчук В.В. – Аспірант.

Література

1. Kobylianskyi R., Yuryk O., Strafun S. (2024). Use of thermoelectric heat meters in locomotor therapy for the rehabilitation of patients with lumbosacral spine injuries. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 69–88. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-69-88>
2. Kobylianskyi R., Lysko V., Boychuk V. (2024). Computer-aided design of thermoelectric microcalorimetric sensors. *Journal of Thermoelectricity*, 1-2, 97–112. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-1-2-97-112>
3. Yuryk O., Anatychuk L., Kobylianskyi R., Yuryk N. (2023). Measurement of heat flux density as a new method of diagnosing neurological disorders in degenerative-dystrophic diseases of the spine. In: *Modern Methods of Diagnosing Diseases*, 2023, 31–68. (Book Chapter). ISBN 978-617-7319-65-7. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-65-7.CH2>
4. Gubenko V., Tkalina A., Yuryk O. (2022). Multidisciplinary rehabilitation of patients with lumbosacral radiculopathy based on the international classification of functioning, disability and health. *Phytotherapy Journal*. <https://doi.org/10.33617/2522-9680-2022-2-33>
5. Anatychuk L.I., Yuryk O.E., Strafun S.S., Stashkevych A.T., Kobylianskyi R.R., Cheviuk A.D., Yuryk N.E., Duda B.S. (2021). Thermometric indicators in patients with chronic lower back pain. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 51–64.

- <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2021-1-51-64>
6. Kobylanskiy R., Przystupa K., Lysko V., Majewski J., Vikhor L., Boichuk V., Zadorozhnyy O., Kochan O., Umanets M., Pasychnikova N. (2025). Thermoelectric measuring equipment for perioperative monitoring of temperature and heat flux density of the human eye in vitreoretinal surgery. *Sensors*, 25(4), Article number: 999. <https://doi.org/10.3390/s25040999>
 7. Anatyshuk L.I., Kobylanskiy R.R., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Boychuk V.V. (2023). Method of calibration of thermoelectric sensors for medical purposes. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 37–49. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-3-37-49>
 8. Kobylanskiy R.R., Lysko V.V., Prybyla A.V., Bukharayeva N.R., Boychuk V.V. (2023). Technological modes of manufacturing medical purpose thermoelectric sensors. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 49–63. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-4-49-63>
 9. Moreddu R., Elsherif M., Butt H. (2019). Contact lenses for continuous corneal temperature monitoring. *RSC Adv.*, 9, 11433–11442. <https://doi.org/10.1039/C9RA00601J>
 10. Grin Yu., Anatyshuk L.I., Gille P. (2024). Chemical bonding and transverse Seebeck effect in o-Al₁₃Co₄. *Book of abstracts of 40th International and 20th European Thermoelectric Conference*. – 2024, 18.
 11. Wang C., Jiao H., Anatyshuk L. (2022). Development of a temperature and heat flux measurement system based on microcontroller and its application in ophthalmology. *Measurement Science Review*, 22, 73–79. <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0009>
 12. Lysko V.V., Razinkov V.V., Havryliuk M.V. (2024). Setup for measuring the electrical contact resistance of "metal–thermoelectric material" structure. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 14–25. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-14-25>
 13. Gresslehner K.H., Krenn M., Kerepesi P. (2024). Non-destructive inspection of thermoelectric modules by scanning acoustic microscopy. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 26–33. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-26-33>
 14. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2024). Thermoelectric thermometry and calorimetry of the active soil layer. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 34–39. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-34-39>
 15. Razinkov V.V., Kuz R.V., Krechun M.M. (2024). Ways to increase the resistance of thermoelectric cooling modules to mechanical impacts. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 40–49. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-40-49>
 16. Esteva A., Kuprel B., Novoa R.A. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nat Med.*, 25 (1), 24–29.
 17. Topol E.J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med.*, 25(1), 44–56.
 18. Rajkomar A., Dean J., Kohane I. (2019). Machine learning in medicine. *N Engl J Med.*, 380(14), 1347–1358.
 19. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436–444.
 20. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press, 800 p.
 21. Eisenman S. (2018). *Building cross-platform apps with react native*. O'Reilly Media,

312 p.

22. Boduch A., Derks R. (2020). *React and react native*. Packt Publishing, 526 p.
23. Griffith, Friedman J., Hassel J. (2019). *React native in action*. Manning Publications, 368 p.
24. Moroney L. (2015). *Firestore essentials*. Packt Publishing, 196 p.
25. Khawas C., Shah P. (2018). Application of firebase in android app development. *International Journal of Computer Applications*, 179(46), 49–53.
26. Price W.N., Cohen I.G. (2019). Privacy in the age of medical big data. *Nat Med.*, 25(1), 37–43.

Submitted: 10.12.25

R.R. Kobylanskyi^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-4664-3162>),
O.S. Yuryk^{1,3} (<https://orcid.org/0000-0003-2245-9333>),
N.R. Bukharayeva¹ (<https://orcid.org/0009-0007-9310-2186>),
A.K. Kobylanska¹ (<https://orcid.org/0009-0007-5483-7614>),
V.V. Boychuk^{1,2} (<https://orcid.org/0009-0006-7852-3452>)

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³State Institution “Institute of Traumatology and Orthopaedics
of the NAMS of Ukraine”, Kyiv, Ukraine

Thermoelectric Heat Meter for the Diagnosis of Neurotrophic Injuries of the Lower Extremities and the Spine

The paper presents the development of a multi-channel portable thermoelectric heat meter with a wireless interface and cross-platform software for the diagnosis of neurotrophic injuries of the lower extremities and human spine. The device provides simultaneous measurement of temperature and heat flux density by four independent channels with the ability to connect via Bluetooth or Wi-Fi interface. Software based on React Native has been developed, running on Windows, macOS, Android and iOS platforms with patient management functions, real-time monitoring, data storage in the Firebase cloud database and the ability to analyze the collected datasets using machine learning methods.

Keywords: thermoelectric heat meter, semiconductor sensor, bismuth telluride-based thermoelectric material, heat flux density, temperature, medical diagnostics, neurotrophic injury, injuries of the lower extremities and spine, computer program, wireless interface, React Native, Firebase, machine learning.

Надійшла до редакції 10.12.25