

СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ ТЕЛЕБІОМЕТРИЧНИХ МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

ЧАСТИНА I. ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО НОСЯТЬСЯ

Ніколов М. О.^{1, 2}, Соловійов О. І.¹, Бурковський Є. О.^{1, 2}

¹Державна установа «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва Національної академії медичних наук України», м. Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Вступ. При дослідженні впливу специфічних факторів виробничого середовища на функціональний стан організму людини є вкрай доцільним застосування інтелектуальних систем моніторингу здоров'я, таких як телебіометрія, з використанням бездротових сенсорних мереж. Сучасні системи такого моніторингу дозволяють вимірювати фізіологічні показники безпосередньо чи в наближених до реальних умовах виконання службових обов'язків працівників, у тому числі ризиконебезпечних професій. При цьому сенсорні елементи вимірювання вбудовуються в елементи одягу, що набув загальну назву «розумний одяг».

Мета дослідження – огляд літератури щодо сучасних телебіометричних методів досліджень у реальному часі, до яких можна застосувати термін «розумний одяг».

Матеріали та методи дослідження. Інформаційний пошук виконувався в Internet пошукових системах і спеціалізованих електронних базах даних, а саме: google.com, Scholar, PubMed, Mendeley, eLIBRARY.

Результати. Даний огляд літератури містить розділи: «Розумний одяг» (інакше «Технології, що носяться», «Wearable Technology»), де зазначаються загальні сучасні тенденції до розвитку моніторингових систем, що вбудовуються в одяг, чи тканину, яка має сенсорні властивості; «Розумні годинники» – можливості телебіометричних систем, що вбудовуються в годинники й розташовуються на зап'ясті, які є найпоширенішими системами моніторингу.

Висновки. Аналіз даних літератури дозволяє з певністю говорити, що для моніторингу функціонального стану організму людини доцільно та необхідно використовувати сучасні технічні (технологічні) системи, які отримали назву «розумний одяг». При цьому для коректної інтерпретації даних необхідно дотримуватись основного принципу – датчики, які контролюють різні функціональні системи організму та оточуючого середовища, повинні бути валідованими, з контрольованими показниками точності вимірювань. Застосування таких систем є перспективним напрямом для впровадження в різних сферах життєдіяльності людини, а особливо в ризиконебезпечних професіях для оцінки функціонального стану організму військових, рятувальників Державних воєнізованих гірничорятувальних служб і аварійно-рятувальних служб з надзвичайних ситуацій, спортсменів, водіїв автотранспортних засобів і робітників інших спеціальностей як в клінічних умовах, під час періодичних медичних оглядів, так і в умовах тренувань і безпосереднього виконання службових обов'язків.

Ключові слова: розумний одяг, розумні годинники, телебіометрія, моніторинг, гірничорятувальники

Вступ

За результатами попередніх власних досліджень було отримане наукове обґрунтування методики моніторингу умов праці та профілактики несприятливої дії виробничих факторів на функціональний стан організму (ФСО) гірничорятувальників. Було визначено ступінь несприятливої дії виробничих факторів на ФСО гірничорятувальників за відповідними гігієнічними та фізіологічними показниками

під час ліквідації аварійних ситуацій, а також у між-аварійний період під час чергувань, планових тренувань, профілактичних обстежень шахт, тактико-технічних змагань [1].

При цьому було встановлено, що діючий підхід до моніторингу факторів виробничого середовища та ФСО гірничорятувальників потребує суттєвого удосконалення, тому що більшість вимірювань вхідних і вихідних параметрів для пов'язаних про-

цесів у реальному часі системи «людина – виробниче середовище» виконується не одночасно, а з певним запізненням на час виконання методики вимірювань.

Так, наприклад, методика визначення теплової стійкості гірничорятувальників, яка проводиться в мікрокліматичній камері [2], базується на визначенні часу приросту температури тіла та частоти серцевих скорочень (ЧСС) за заданих (контрольованих) параметрів теплового та фізичного навантаження. Температура повітря за методикою повинна бути $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$, відносна вологість – $(85 \pm 5) \%$, вміст кисню в повітрі має бути не менше ніж 20,6 % об., вуглекислого газу – не більше ніж 0,1 % об. Фізичні навантаження задаються виконанням роботи з підйомів на сходинку і спусках з неї в ритмі 20 разів за 1 хв (степ-тест), або підйомом вантажу (20 кг) двома руками в такому самому ритмі за допомогою металевого тросу та блочного пристрою. Тривалість роботи визначається часом приросту температури тіла на $1,0^\circ\text{C}$.

За даними власних спостережень встановлено, що при виконанні цієї методики відділенням гірничорятувальників у складі з 4 осіб одночасний контроль усіх параметрів (фізичних і фізіологічних) одноособово командиром взводу з оперативно-медичної служби неможливий для прийняття рішення про індивідуальну теплову стійкість рятувальника. З моменту вимірювань відповідних фізіологічних параметрів у першого респіраторника відділення до четвертого проходить не менше 2 хв, і за цей час у останнього відбувається часткове відновлення фізіологічних функцій, що спотворює результати тестування ФСО, оцінки фізичної та теплової витривалості, та може бути причиною хибних висновків щодо готовності належно виконувати свої професійні обов'язки з ліквідації аварійних ситуацій.

Вирішення цієї актуальної наукової проблеми можливе лише завдяки застосуванню мультидисциплінарного підходу до впровадження найсучасніших досягнень у різних дослідженнях. Особливе місце в цьому сенсі займають медико-інженерні та біоінженерні технології на засадах дистанційних технологій моніторингу факторів виробничого середовища та ФСО людини. Такі системи можуть бути застосовані як в клінічній практиці, так і для оцінки стану спортсменів, військових, рятувальників, водіїв автотранспортних засобів і робітників інших ризиконебезпечних спеціальностей.

Однак сьогодні в Україні є проблеми застосування моніторингових технологій як в охороні здоров'я населення територіальних громад, так і в охороні здоров'я працюючих у ризиконебезпечних галузях виробництва. Це є проблеми теоретичного, методологічного та прикладного характеру.

Проведений попередній аналіз літератури свідчить про необхідність подальших наукових досліджень впливу специфічних факторів виробничого середовища на ФСО гірничорятувальників зі застосуванням переважно інтелектуальних систем моніторингу здоров'я таких, як телебіометрія та бездротові сенсорні мережі з максимальним ступенем інформаційного захисту.

Розвитком окресленого напрямку досліджень може бути удосконалення методики оцінки умов праці та ФСО гірничорятувальників. Ці методики повинні враховувати вплив специфічних факторів аварійних та/або надзвичайних ситуацій.

Мета дослідження – огляд літератури сучасних біотелеметричних методів досліджень у реальному часі, до яких можна застосувати термін «розумний одяг».

Матеріали та методи дослідження

Інформаційний пошук виконувався в Internet пошукових системах і спеціалізованих електронних базах даних, а саме: google.com, Scholar (<https://scholar.google.com>), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>), Mendeley (<https://www.mendeley.com>), eLIBRARY (<https://elibrary.ru>).

Результати дослідження та їх обговорення

Виходячи з достатньо великої актуальності даної проблеми в медицині, спорті, промисловості та інших галузях, що знаходить своє відображення у величезній кількості розробок і публікацій, дане дослідження представлена у вигляді двох частин.

Частина I – «Технології, що носяться» – присвячена опису загальних тенденцій і принципів роботи «розумного одягу», що розуміється під цим терміном, і також найпопулярнішим системам моніторингу – «розумним годинникам».

Частина II – «Сенсорні системи» – буде присвячена висвітленню таких моніторингових систем, як «розумні жилети», сенсорні системи на захисних шоломах, шкін-конформні платформи, системи ай-трекінгу, а також технології 3D-принтингу.

«Розумний одяг». До найперспективніших методів моніторингових телебіометричних технологій можна віднести технології, які пов'язані з терміном «розумний одяг». Розумний одяг (Smart Clothing) – одяг, який може інтерактивно взаємодіяти з навколишнім середовищем, сприймати від нього сигнали, обробляючи інформацію та запускаючи реакції у відповідь [3]. У загальному випадку розумні технології, що дозволяють вимірювати ті чи інші сигнали в реальному часі під час робочої/денної/буденної активності, називають Wearable Technology (чи Smart Garments), тобто системи, які можна носити.

Термін «розумний одяг» характеризує одяг, в який безпосередньо вмонтовані датчики та біосенсори. Сигнали з цих елементів вимірювання передаються на електронні пристрої, де вони зберігаються чи в реальному часі передаються до сприймаючого пристрою, зазвичай за допомогою Bluetooth, Wi-Fi, або іншою бездротовою мережевою технологією.

Натепер існує достатньо багато синонімів терміна «розумний одяг», які в тому чи іншому сенсі підкреслюють його особливість: у вузькому сенсі «розумний одяг» означає безпосередньо одяг, що має властивості щось вимірювати і/або реагувати на зміни оточуючого середовища, має інтегровані

електронні пристрої; «розумний сенсор» (smart sensors, smart devices, smart systems) – сенсорна система, що передбачає елементи вимірювання, передачі, візуалізації та інтерпретації даних; злиття датчиків (Sensor fusion) – передбачає інтеграцію різних сенсорів в один вимірювальний модуль [4]; якщо елементом вимірювальної системи виступає тканина одягу, то зазвичай її називають e-тканина (e-textil, чи electronic-textile, чи smart textile); якщо така тканина використовується для виміру температури – t-тканина (t-textile) і т. ін.

Сьогодні «розумний одяг» широко використовується при моніторингу стану космонавтів, спортсменів, військових, широко застосовується в медичних і наукових дослідженнях.

Для ілюстрації високого науково-практичного світового інтересу до «розумного одягу» наведемо дані в таблиці 1, які показують кількість наукових посилань за 2017–2022 роки в таких популярних пошукових системах, як Scholar, PubMed, Mendeley, eLIBRARY. Відмітимо, що дещо менша кількість цитувань у eLIBRARY порівняно з іншими базами може бути обумовлена англійськими варіантами ключових слів, тобто, пошук переважно здійснювався за назвами статей та анотаціями.

Імовірно перші відповідні ідеї та технологічні впровадження були пов'язані з розвитком космічної

Таблиця 1

Кількість посилань за 2017–2022 роки в пошукових системах за основними ключовими словами

Ключове слово	Scholar	PubMed	Mendeley	eLIBRARY
«Wearable Technology»	19 400	1020	3468	1102
«Smart shirt» AND rescuer	79	-	-	-
«Smart shirt» AND emergency	359	2	2	-
«Smart shirt»	1100	22	80	7
«Smart textile»	6390	278	2819	235
«Smart Clothing»	6060	73	430	122
«Smartwatch» or «Smart watch»	17 600	594	2543	113
«Skin-Conformal»	775	20	465	69
«Sensor fusion» AND medical	15 800	62	5224	31
«Electronic-skin»	13 700	526	1582	197
«Sweat sticker»	36	6	2	1
«Sweat patch»	369	74	221	25
«patch» AND medical	109 000	25 604	4600	203
«temperature patch» AND medical	130	729	1284	8
«Eye tracking»	38 600	7268	16 805	1426
«Flexible temperature sensor» AND medical	465	4	579	22

техніки, зокрема, скафандрів, де від показників датчиків про стан людини у великій мірі залежить функціонування системи життєдіяльності. Так, сьогодні при роботі в скафандрі вимірюється ЧСС, температура тіла (у заушній ямці), контролюється атмосферний тиск, концентрація діоксиду вуглецю (CO_2), різниця концентрацій CO_2 на вході та виході дихальної системи балона та ін. [5].

Достатньо широке впровадження «розумного одягу» набуло в спорті. Переважна більшість застосування «розумних технологій» стосується моніторингу параметрів серцево-судинної системи, а саме: ЧСС, температури тіла, рівня насичення киснем гемоглобіну артеріальної крові (далі – сатурації або SpO_2). Існує одяг, де відповідні сенсори є невід'ємним елементом одягу. Це дозволяє вирішувати проблеми зручності під час виконання фізичних навантажень. Досягається це чи мініатюризацією електронних пристроїв, чи використанням як сенсори та провідники струму спеціальних тканин [6–8]. Так, наприклад, у роботах [9, 10] досліджується можливість вимірювання тиску, що може бути використано, наприклад, при вимірюваннях пульсу, електропедографії з метою аналізу ходи, величини механічного тиску на пальці рук при виконанні тієї чи іншої роботи тощо. Комерційні розробки в цьому напрямі пропонують, зокрема, у Fraunhofer Institute for Silicate Research ISC [11, 12]. Інший приклад використання так званого smart textile є вимірювальна система Sensoria Smart Socks V.2.0 – шкарпетки, які дозволяють моніторити швидкість ходьби, обертання педалей велосипеда, ступінь навантаження на ноги при стрибках, оцінити енерговитрати [13]. Для створення smart textile та відповідних виробів достатню популярність набула полімерна суміш двох іономерів – PEDOT:PSS, на основі якого створюють сенсори тиску, вологості та температури [14]. Використовують також і струмопровідні нитки з Cu , Cu/Ag , AgCu та інші, які вплітаються в бавовну, нейлонову, віскозну тканини. Ряд типових електричних характеристик таких тканин наведено в [15].

Перспективним методом вимірювання механічних напруг, у тому числі при електропедографії, є використання текстилю, де замість окремих волокон використовують гнучкі еластичні оптичні волокна. При накладанні на них зовнішньої сили вони деформуються та змінюють оптичний опір, що дозволяє вимірювати механічне навантаження від 0 до 30 Н з похибкою до 5 % [16]. Зазначимо, що оптичні ефекти, що виникають на неоднорідностях

оптопровідників, широко використовуються в галузі високої моди [17, 18]. Однак не тільки оптичні естетичні ефекти привертають увагу до відповідного одягу, а й можливість підводити до поверхні шкіри світло, що дозволяє здійснювати фізіотерапевтичний вплив, а за наявності сенсорів вимірювати фізіологічні показники [19, 20].

Згадані вище оптоелектронні технології, використання струмопровідних тканин у більшій мірі знаходяться на етапі експериментальних досліджень, промислових зразків, тому не широко представлені в комерційній сфері.

Огляду різноманітних комерційних виробів «Wearable Technology», що відрізняються за факторами, матеріалами, сенсорами, мережевими технологіями й які в тій чи іншій мірі пройшли наукову верифікацію, присвячена робота [21]. У зазначеній публікації відповідні технології були використані для моніторингу фізичної активності людини (при патологіях та в спорті) і траєкторії переміщення, епілептичних проявів, стресу та емоційного стану, сну, оцінки тривоги та ін.

«Розумні годинники». Суттєво більшу комерціалізацію та впровадження отримали такі елементи «розумного одягу», як «розумні годинники» (Smartwatch) [22, 23]. Ринок таких пристроїв розвивається достатньо швидко, і кожен рік з'являються нові виробники та відповідні спектри моделей. Це, у свою чергу, вкрай ускладнює валідацію «розумних годинників» для практичного професійного застосування. Однак сьогодні можна виділити лідерів виробників у цій сфері. До них відносяться: Fitbit, Garmin, Apple, Misfit, Samsung Gear, TomTom, Lumo [24]. Основний функціонал «розумних годинників» полягає у вимірюванні та моніторингу таких показників, як ЧСС, варіабельність серцевого ритму (BCP), енергетичні втрати, кількість пройдених кроків (Step Count). У більшості таких пристроїв вбудовані датчики акселерометрії (ACC) та гіроскопа. До допоміжних функцій годинників можна віднести: оцінку SpO_2 , трекінг на основі GPS (*англ.* tracking «відстеження, супровід»), моніторинг артеріального тиску (AT), температури тіла, сну. Однак останні функції не достатньо валідовані в рамках науково-практичних досліджень. Слід зазначити, що оцінка надійності всіх згаданих промислово впроваджених рішень при рутинному їхньому використанні майже не представлена в науковій літературі. Щодо основних параметрів вимірювання, то зазначають наступні усереднені характеристики точності (табл. 2).

Таблиця 2

Усереднені характеристики адекватності вимірювання параметрів «розумними годинниками» [24]

Характеристика	Коефіцієнт кореляції з іншими методами вимірювання	Середньо квадратична відносна похибка, %
Крокомір	0,60–0,77	1,08–15,0
Частота серцевих скорочень	0,67–0,95	~ 4,5
Енергетичні витрати	0,49–0,86	23–33

Деякі моделі «розумних годинників» надають користувачу не тільки інформацію про середні значення того чи іншого фізіологічного параметра, а й безпосередньо сигнал, на основі якого проводяться обчислення. Це дозволяє суттєво розширити спектр розрахункових значень і більш широко застосовувати відповідні пристрої в спорті та медицині в цілому. Так, наприклад, у роботі [25] розглядаються годинники Apple Watch, Samsung Galaxy, Withings Move ECG для моніторингу серцевої аритмії. Вказане посилання цікаво ще й тим, що в ньому розглядаються типові артефакти, що виникають при вимірюванні безперервних сигналів. Ці особливості властиві, імовірно, усім «розумним речам», які передбачають їхнє використання поза строгих клінічних умов.

В оглядовій роботі [26] йдеться про достатньо високу точність, специфічність і чутливість (близько 0,97) показників для виявлення фібриляції передсердь, брадиритмій, тахіритмій, а також аритмій (передчасних скорочень серцевих м'язів) зі застосуванням фотоплетизмографії (PPG). Ця робота посиляється на дослідження з використанням наступних «розумних годинників»: Apple watch, Samsung Gear S3, Wavelet wristband, Amazfit Health Band 1S (Huami), The Honor Band4 (Huawei), The Honor Watch (Huawei), Huawei Watch GT, Empatica E4, Samsung Simband, Empatica E4.

Слід зазначити, що висновки про ФСО людини, наприклад, психоемоційної сфери, можна робити не тільки на основі вимірювання біологічних сигналів, а й за допомогою аналізу рухливості людини, записуючи її траєкторію руху впродовж дня [27]. Так, в оглядовій роботі [28] аналізуються пристрої для діагностики рівня стресу, депресії, тривожності, безсоння, в які вмонтовані і/або акселерометр, Wi-Fi, GPS. У цій самій публікації згадуються такі можливості «розумних годинників», як проведення фотоплетизмографії та електродермальної активності (ЕДА чи Electrodermal activity (EDA)).

Зазначимо, що на основі даних PPG можливо оцінювати також і SpO_2 , ЧСС, ВСР та АТ. У сучасних «розумних годинниках» використовують 3 основних світлодіоди (на різних довжинах хвиль) – зелений, червоний та інфрачервоний, та від 2 до 4 фотоприймачів. Це забезпечує різну проникність світла в структури шкіри та отримання інформації щодо стану судин на різних глибинах. Однак слід зазначити, що в більшості випадків оцінка SpO_2 та інших параметрів фотоплетизмографії за даними «розумних годинників» є не достатньо верифікованою, похибки вимірювання та розрахункових діагностично-значущих параметрів можуть перевищувати 10 %. Для покращання якості вимірювання показників ФСО людини пропонують мінімізувати рухливість. Тому, для забезпечення коректних вимірювань та аналізу артефактів ведуться дослідження щодо багатоканальних сенсорів, де використовується одразу декілька однотипних фотопар (джерело світла – фотоприймач) на різних довжинах хвиль [29, 30].

Варта уваги можливість моніторингу АТ за даними PPG. Така оцінка виконується при вимірюванні швидкості розповсюдження світла в тканинах (точніше в судинах), а також часу підвищення та спаду сигналу. У цьому сенсі в комерційній реалізації вигідно виділяється продукт «Samsung Galaxy Watch 3» [31], хоча за даними інтернет-пошуку можна виділити [28, 31, 32]: «Huawei Watch D», «Omron HeartGuide», «FitVII Smartwatch», «InBodyWATCH». Дослідження останньої моделі показують, що похибка вимірювання АТ складає менше ніж 5 мм рт. ст. у 70–80 % експериментальних вимірювань, менше ніж 10 мм рт. ст. у 86–98 %, менше ніж 15 мм рт. ст. у 97–99 % [32]. Існують публікації де достатньо критично аналізується точність вимірювання фізіологічних показників за допомогою «розумних годинників» [33], зокрема, тиску крові та SpO_2 . Безперечно, завжди бажано мати точні й надійні пристрої вимірювання, що працюють у широкому діапазоні умов. Однак слід

зауважити, що цінність в моніторингових дослідженнях полягає не тільки в дискретних вимірюваннях час від часу, а й у тому, як змінюються показники протягом тривалого часу дня, протягом спортивного чи іншого виду фізичного навантаження й т. п. У цьому випадку найціннішими медико-біологічними даними є контроль динаміки процесу, а не абсолютні значення показників ФСО.

Ще одна згадана раніше функція «розумних годинників» – можливість виміру EDA, які модулюються активністю потових залоз, чи в більш загальному випадку периферичною симпатичною нервовою та вегетативною системами [28, 34]. Серед комерційних «розумних годинників» з функцією виміру EDA поки що можна виділити тільки продукти «Fitbit Sense» [35], «Empatica E4» [36]. Останній пристрій позиціонується як прилад медичного класу й включає сенсори: PPG (для оцінки пульсації крові в судинах, ЧСС і ВСР), акселерометр (для оцінки рухливості пацієнта), EDA та інфрачервоний термометр. Також слід зазначити експериментальні розробки для моніторингових досліджень з використанням EDA, наприклад, [37, 38].

Важливе інше спостереження щодо використання ряду комерційних «розумних годинників» у роботі [39]. Так, автори аналізували можливості різних сенсорів (для вимірювання ЧСС, частоти дихання, EDA, температури, PPG) оцінювати рівень стресу. Один з висновків роботи полягає в тому, що кожен вид вимірювання дозволяє охарактеризувати рівень стресу при фізичних навантаженнях, однак збільшення різних сигналів при моніторингу підвищує точність і швидкість прийняття рішення системою розпізнавання фізіологічного стану.

Велику роль при моніторингових дослідженнях відіграють не тільки безпосередньо системи вимірювання, а й програмне забезпечення, яке дозволяє візуалізувати, провести аналіз, згенерувати протокол результатів, сконвертувати дані в інші формати для подальшої обробки, вести базу ек-

периментальних даних. Далеко не всі комерційні «розумні годинники» надають користувачу таку можливість [28]. Проте за даними літератури слід окремо виділити [40]: Garmin Connect (<https://connect.garmin.com>), Strava (<https://www.strava.com/>), Movescount (<http://www.movescount.com/>), Polar (<https://flow.polar.com/>), Endomondo (<https://www.endomondo.com/>), Runtastic (<https://www.runtastic.com/>); у [41] виділяють програмні засоби FitNalyser та Bru-Fit. Щодо розробки відповідних програмних засобів звертає на себе увага рекомендація лікарів армії США [42] – графічний інтерфейс користувачів для системи моніторингу фізіологічного статусу.

Висновки

1. Аналіз даних літератури дозволяє з певністю говорити, що для моніторингу ФСО людини доцільно та необхідно використовувати сучасні технічні (технологічні) системи, які отримали назву «розумний одяг». При цьому для коректної інтерпретації даних необхідно дотримуватись основного принципу – датчики, які контролюють різні функціональні системи організму та оточуючого середовища повинні бути валідованими, з контрольованими показниками точності вимірювань.
2. Застосування таких систем є перспективним напрямом для впровадження в різних сферах життєдіяльності людини, а особливо в ризиконебезпечних професіях для оцінки ФСО військових, рятувальників Державних воєнізованих гірничорятувальних служб і аварійно-рятувальних служб з надзвичайних ситуацій, спортсменів, водіїв автотранспортних засобів і робітників інших спеціальностей як у клінічних умовах, під час періодичних медичних оглядів, так і в умовах тренувань й безпосереднього виконання службових обов'язків.

2. Максимович В. О., Солдак І. І., Горецький О. С. Контроль та поліпшення теплового стану людини; під редакцією І. І. Солдак. Донецьк, 1997. 158 с.

3. Умная одежда. 2022. URL: ru.wikipedia.org.

4. Fusion and Smart Sensor in Sports and Biomedical Applications. Jr. Mendes, M. Vieira, M. Pires et al. *Sensors*. 2016. Vol. 16, № 10. P. 1569. <https://doi.org/10.3390/s16101569>.

5. Российский опыт медицинского обеспечения внекорабельной деятельности космонавтов, прове-

Література

1. Оцінка рівня адаптації до стресових ситуацій і фізичних навантажень гірничорятувальників. О. І. Соловйов, Я. В. Кудієвський, К. О. Апихтін та ін. Матеріали XII Науково-практичної конференції «Актуальні питання патології за умов дії надзвичайних факторів на організм», присвячена засновникам кафедри патофізіології проф. Бергеру Е. Н. і проф. Марковій О. О. (Галицькі читання II) 29–30 жовтня. Тернопіль, 2020. С. 96–97.

денной с борта международной космической станции в 2001–2015 гг. В. П. Катунцев, Ю. Ю. Осипов, С. Н. Филипенков и др. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2016. Т. 55, № 1. С. 8–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rossiyskiy-opyt-meditsinskogo-obespecheniya-vnekorabelnoy-deyatelnostikosmonavtov-provedennoy-s-borta-mezhdunarodnoy-kosmicheskoy/viewer>.

6. Conductive polymers for smart textile applications. A. M. Grancaric, I. Jerkovic, V. Koncar et al. *Journal of Industrial Textiles*. 2017. Vol. 48, № 3. P. 612–642. <https://doi.org/10.1177/1528083717699368>.

7. Review on Smart Electro-Clothing Systems (SeCSs). A. S. M. Sayem, S. H. Teay, H. Shahariar et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 3. P. 587. <https://doi.org/10.3390/s20030587>.

8. Cherenack K., Pieterse L., Cherenack K. Smart textiles: Challenges and opportunities. *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112, № 9. P. 091301. <https://doi.org/10.1063/1.4742728>.

9. Easy-to-Build Textile Pressure Sensor. F. Pizarro, P. Villavicencio, D. Yunge et al. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 4. P. 1190. <https://doi.org/10.3390/s18041190>.

10. Elastic sensors for smart textiles. Technische Textilien. May 15, 2019. P. 25. URL: https://www.isc.fraunhofer.de/content/dam/isc/cesma/de/documents/Technische_Textilien_Elastic-sensors-for-smart-textiles.

11. Textile-Integrated Elastic Sensors For Strain And Compression Load Measurement. URL: https://www.isc.fraunhofer.de/content/dam/isc/de/documents/Publikationen/Textile_integrated_sensors.pdf.

12. Monitoring and non-invasive diagnostics Fraunhofer IIS and Fraunhofer ISC. URL: <https://www.cesma.de/content/dam/isc/cesma/de/Praesentationen/MonitoringAndNon-invasiveDiagnostics.pdf>.

13. Evaluating the Sensoria Smart Socks Gait Monitoring System for Rehabilitation Outcomes. J. Yeung, D. Catolico, N. Fullmer et al. *PM&R*. 2019. Vol. 11, № 5. P. 512–521. <https://doi.org/10.1002/pmjr.12003>.

14. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors. X. Zhang, W. Yang, H. Zhang et al. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2021. Vol. 4, № 4. P. 045004. <https://doi.org/10.1063/10.0006866>.

15. Smart Textiles and Sensorized Garments for Physiological Monitoring: A Review of Available Solutions and Techniques. A. Angelucci, M. Cavicchioli, I. A. Cintorrino et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 3. P. 814. <https://doi.org/10.3390/s21030814>.

16. Rothmaier M., Luong M., Clemens F. Textile Pressure Sensor Made of Flexible Plastic Optical Fibers. *Sensors*. 2008. Vol. 8, № 7. P. 4318–4329. <https://doi.org/10.3390/s8074318>.

17. Kirstein T. The future of smart-textiles development: new enabling technologies, commercialization and market trends. *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers*. Woodhead Publishing, 2013. P. 92–128. <https://doi.org/10.1533/9780857093530.1>.

18. Ruckdashel R., Venkataraman R. D., Park J. H. Smart textiles: A toolkit to fashion the future. *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 129, № 13. P. 130903. <https://doi.org/10.1063/5.0024006>.

19. Wearable Fiber Optic Technology Based on Smart Textile: A Review. Z. Gong, Z. Xiang, X. Ou, Yang et al. *Materials*. 2019. Vol. 12, № 20. P. 3311. <https://doi.org/10.3390/ma12203311>.

20. Zaman S. U., Tao X., Cochrane C., Koncar V. Smart E-Textile Systems: A Review for Healthcare Applications. *Electronics*. 2021. Vol. 11, № 1. P. 99. <https://doi.org/10.3390/electronics11010099>.

21. A Review of Wearable Solutions for Physiological and Emotional Monitoring for Use by People with Autism Spectrum Disorder and Their Caregivers. M. Taj-Eldin, C. Ryan, B. O'Flynn, P. Galvin. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 12. P. 4271. <https://doi.org/10.3390/s18124271>.

22. Smart watches: A review of evolution in biomedical sector. R. S. Chandel, S. Sharma, S. Kaur et al. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 50. P. 1053–1066. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.460>.

23. Smart Watch Potential to Support Augmented Cognition for Health-Related Decision Making. B. Reeder, P. F. Cook, P. M. Meek, M. Ozkaynak. *Springer, Cham*. 2017. P. 372–382. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58628-1_29.

24. Current State of Commercial Wearable Technology in Physical Activity Monitoring 2015–2017. J. A. Bunn, J. W. Navalta, C. J. Fountaine, J. D. Reece. *International journal of exercise science*. 2018. Vol. 11, № 7. P. 503–515. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5841672/>.

25. Smartwatch-based detection of cardiac arrhythmias: Beyond the differentiation between sinus rhythm and atrial fibrillation. M. Strik, S. Ploux, F. D. Ramirez et al. *Heart Rhythm*. 2021. Vol. 18, № 9. P. 1524–1532. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2021.06.1176>.

26. Diagnostic Accuracy of Smartwatches for the Detection of Cardiac Arrhythmia: Systematic Review and Meta-analysis. S. Nazarian, K. Lam, A. Darzi, H. Ashrafian. *Journal of Medical Internet Research*. 2021. Vol. 23, № 8. P. 28974. <https://doi.org/10.2196/28974>.

27. Detecting Bipolar Depression From Geographic Location Data. N. Palmius, A. Tsanas, K. E. A. Saunders et al. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 64, № 8. P. 1761–1771. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2611862>.

28. Potential Applications of Mobile and Wearable Devices for Psychological Support During the COVID-19 Pandemic: A Review. K. Ueafuea, C. Boonnag, Sudhawiyangkul et al.

IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, № 6. P. 7162–7178. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3046259>.

29. Motion Artifact Reduction in Wearable Photoplethysmography Based on Multi-Channel Sensors with Multiple Wavelengths. J. Lee, M. Kim H-K. Park, I. Y. Kim. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 5. P. 1493. <https://doi.org/10.3390/s20051493>.

30. Multi-wavelength photoplethysmography method for skin arterial pulse extraction. J. Liu, B. P. Yan, W. Dai et al. *Biomedical Optics Express*. 2016. Vol. 7, № 10. P. 4313. <https://doi.org/10.1364/BOE.7.004313>.

31. A Guide to the Best Blood Pressure Monitor Watches of 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.healthline.com/health/best-blood-pressure-monitor-watches>.

32. Validation of a wearable cuff-less wristwatch-type blood pressure monitoring device. J. H. Moon, M. Kang, C. Choi et al. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, № 1. P. 2045–2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75892-y>.

33. Accuracy of Vital Signs Measurements by a Smartwatch and a Portable Health Device: Validation Study. C. Hahnen, C. G. Freeman, N. Haldar et al. *JMIR mHealth and uHealth*. 2020. Vol. 8, № 2. P. 16811. <https://doi.org/10.2196/16811>.

34. Sharma M., Kacker S., Sharma M. A Brief Introduction and Review on Galvanic Skin Response. *International Journal of Medical Research Professionals*. 2016. Vol. 2, № 6. P. 254–257. <https://doi.org/10.21276/ijmrp.2016.2.6.003>.

35. Fitbit debuts Sense, its most advanced health smartwatch; world's first with EDA sensor for stress management, plus ECG app, SpO₂ and skin temperature sensors. 2020. URL: <https://investor.fitbit.com/press-releases/press-release-details/2020/Fitbit-Debuts-Sense-Its-Most-Advanced-Health-Smartwatch-Worlds-First-With-EDA-Sensor-for-Stress-Management-Plus-ECG-App-SpO2-and-Skin-Temperature-Sensors/default.aspx> (дата звернення: 01.02.2022).

36. Making Wearable Technology Available for Mental Healthcare through an Online Platform with Stress Detection Algorithms: The Carewear Project. G. Debar, N. D. Witte, R. Sels et al. *Journal of Sensors*. 2020. P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/8846077>.

37. Affanni A. Wireless Sensors System for Stress Detection by Means of ECG and EDA Acquisition. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 7. P. 2026. <https://doi.org/10.3390/s20072026>.

38. Banganho A. R., Santos M. B., Silva H. P. Design and Evaluation of an Electrodermal Activity Sensor (EDA) With Adaptive Gain. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, № 6. P. 8639–8649. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3050875>.

39. Siirtola P. Continuous stress detection using the sensors of commercial smartwatch. UbiComp/ISWC '19 Adjunct: Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers September 2019. 2019. P. 1198–1201. <https://doi.org/10.1145/3341162.3344831>.

40. Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review. A. Kamisalic, I. Fister, M. Turkanovic, S. Karakatic. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 6. P. 1714. <https://doi.org/10.3390/s18061714>.

41. Angelides M. C., Wilson L. A. C., Echeverria P. L. B. Wearable data analysis, visualisation and recommendations on the go using android middleware. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. Vol. 77, № 20. P. 26397–26448. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5867-y>.

42. Tharion W. J., Kaushik S. Usariem Technical Report T07-04: Graphical user interface (GUI) for the warfighter physiological status monitoring (WPSM) system – U.S. army medic recommendations. *Biophysics and Biomedical Modeling Division*. 2006. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA459019.pdf>. <https://doi.org/10.21236/ADA459019>.

Николов Н. А.^{1, 2}, Соловьев А. И.¹, Бурковский Е. А.^{1, 2}

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕБИОМЕТРИЧЕСКИХ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

ЧАСТЬ I. НОСИМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

¹ Государственное учреждение «Институт медицины труда имени Ю. И. Кундиева Национальной академии медицинских наук Украины», г. Киев

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

Введение. При исследованиях влияния специфических факторов производственной среды на функциональное состояние организма человека целесообразно применение интеллектуальных систем мониторинга здоровья, таких как телебиометрия, с использованием беспроводных сенсорных сетей. Современные системы такого мониторинга позволяют измерять физиологические показатели непосредственно или в приближенных к реальным условиям при

исполнении своих служебных обязанностей в профессиях, связанных с риском для здоровья и жизни. При этом сенсорные элементы измерения встраиваются в элементы одежды, что и обусловило термин «умная одежда».

Цель исследования — обзор литературы современных телебиометрических методов исследований в реальном времени, к которым можно применить термин «умная одежда».

Материалы и методы исследования. Информационный поиск производился в Internet поисковых системах и специализированных электронных базах данных: google.com, Scholar, PubMed, Mendeley, eLIBRARY.

Результаты. Данный обзор литературы содержит разделы: «Умная одежда» («Носимые технологии», «Wearable Technology»), где указываются общие современные тенденции развития мониторинговых систем, встраиваемых в одежду, или ткань, которая обладает сенсорными свойствами; «Умные часы» — возможности телебиометрических систем, встраиваемых в часы и располагающихся на запястье, которые являются наиболее распространенными системами мониторинга.

Выводы. Анализ данных литературы позволяет с уверенностью говорить, что для мониторинга функционального состояния организма целесообразно и необходимо использовать технические системы, получившие название «умная одежда». При этом для корректной интерпретации данных необходимо соблюдать основной принцип — датчики, контролируемые различные функциональные системы организма и окружающей среды, должны быть валидированными, с контролируемыми показателями точности измерений. Применение таких систем является перспективным направлением для внедрения в различных сферах жизнедеятельности человека, особенно в рискованных профессиях для оценки функционального состояния организма военных, спасателей Государственных военизированных горноспасательных служб и аварийно-спасательных служб по чрезвычайным ситуациям, спортсменов, водителей автотранспортных средств и работников других специальностей как в клинических условиях, во время периодических медицинских осмотров, так и в условиях тренировок и непосредственного исполнения служебных обязанностей.

Ключевые слова: умная одежда, умные часы, телебиометрия, мониторинг, горноспасатели

Nikolov N. A.^{1, 2}, Soloviov O. I.¹, Burkovskiy Y. A.^{1, 2}

MODERN CAPABILITIES OF TELEBIOMETRIC MONITORING STUDIES OF THE FUNCTIONAL STATE OF THE HUMAN BODY REVIEW

PART I. WEARABLE TECHNOLOGY

¹ State Institution «Kundiiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

Introduction. When studying the influence of specific factors of the production environment on the functional state of the human body, it is advisable to use intelligent health monitoring systems such as telebiometry using wireless sensor networks. Modern systems for such monitoring make it possible to measure physiological indicators directly or in conditions close to the real conditions of the performance of official duties of workers, in particular, dangerous professions. At the same time, sensory elements of measurement are embedded in the elements of clothing, which led to the term «smart clothing».

The purpose of the study is a literary review of modern telebiometric research methods in real time, to which the term «smart clothes» can be applied.

Materials and methods of research. Information search was carried out in the Internet search engines and specialized electronic databases: google.com, Scholar, PubMed, Mendeley, eLIBRARY.

Results. This review contains sections: «Smart clothing» (or «Wearable Technology»), which indicates the general current trends in the development of monitoring systems built into clothing, or the fabric of which has sensory properties; «Smart watch» — the capabilities of telebiometric systems built into watches and located on the wrist, which are the most common monitoring systems.

Conclusions. An analysis of the literature data allows us to say with confidence that it is advisable and necessary to use technical systems called «smart clothes» to monitor human physiological parameters. In this case, for the correct interpretation of the data it is necessary to observe the basic principle — sensors that monitor various functional systems of the body and the environment must be validated, with controlled indicators of measurement accuracy. The use of such systems is a promising direction for implementation in various spheres of human life, especially in high-risk occupations to assess the functional state of the military, rescuers of the State Military Mining Rescue Services and Emergency Rescue Services, athletes, drivers and other professionals, clinical conditions, during periodic medical examinations, and in the conditions of training and direct performance of official duties.

Key words: smart clothes, smart watches, telebiometrics, physiological monitoring, mine rescue

References

1. Soloviov, O. I., Kudievsky, Ya. V., Apikhtin, K. O. et al. (2020), «Estimation of the level of adaptation to stressful situations and physical loads of rescuers», Proceedings of the XII Scientific and Practical Conference «Actual issues of pathology under the influence of extraordinary factors on the body», dedicated to the founders of the Department of Pathophysiology prof. Bergeru E. N. and prof. Markoviy O. O. (Galician Readings II) October 29–30. Ternopil, pp. 96–97.
2. Maksimovich, V. O., Soldak, I. I., Goretzkiy, O. S. (1997), *Kontrol ta pollpshennya teplovogo stanu lyudini*. Donetsk, 158 p.
3. Wearable technology, (2022). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wearable_technology ru.wikipedia.org.
4. Mendes, Jr., Vieira, M., Pires, M. (2016), «Sensor Fusion and Smart Sensor in Sports and Biomedical Applications», *Sensors*, Vol. 16, No. 10, pp. 1569. <https://doi.org/10.3390/s16101569>.
5. Katuntsev, V. P., Osipov, Yu. Yu., Filipenkov, S. N., et al. (2016), «Russian Experience in the Medical Support of Extravehicular Activity Conducted from the International Space Station: 2001–2015», *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy*, Vol. 55, No. 1, pp. 8–18.
6. Grancaric, A. M., Jerkovic, I., Koncar, V. et al. (2017), «Conductive polymers for smart textile applications», *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 48, No. 3, pp. 612–642. <https://doi.org/10.1177/1528083717699368>.
7. Sayem, A. S. M., Teay, S. H., Shahariar, H. et al. (2020), «Review on Smart Electro-Clothing Systems (SeCSs)», *Sensors*, Vol. 20, No. 3, pp. 587. <https://doi.org/10.3390/s20030587>.
8. Cherenack, K., and Pieterse, L. (2012), «Smart textiles: Challenges and opportunities», *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, No. 9, pp. 091301. <https://doi.org/10.1063/1.4742728>.
9. Pizarro, F., Villavicencio, P., Yunge, D. et al. (2018), «Easy-to-Build Textile Pressure Sensor», *Sensors*, Vol. 18, No. 4, pp. 1190. <https://doi.org/10.3390/s18041190>.
10. Elastic sensors for smart textiles, Technische Textilien, (2019), pp. 25. URL: https://www.isc.fraunhofer.de/content/dam/isc/cesma/de/documents/Technische_Textilien_Elastic-sensors-for-smart-textiles.
11. Textile-Integrated Elastic Sensors For Strain And Compression Load Measurement. URL: https://www.isc.fraunhofer.de/content/dam/isc/de/documents/Publikationen/Textile_integrated_sensors.pdf.
12. Monitoring and non-invasive diagnostics Fraunhofer IIS and Fraunhofer ISC. URL: <https://www.cesma.de/content/dam/isc/cesma/de/Praesentationen/MonitoringAndNon-invasiveDiagnostics.pdf>.
13. Yeung, J., Catolico, D., Fullmer, N. et al. (2019), «Evaluating the Sensoria Smart Socks Gait Monitoring System for Rehabilitation Outcomes», *PM&R*, Vol. 11, No. 5, pp. 512–521. <https://doi.org/10.1002/pmrj.12003>.
14. Zhang, X., Yang, W., Zhang, H. et al. (2021), «PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors», *Nanotechnology and Precision Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 045004. <https://doi.org/10.1063/1.5006866>.
15. Angelucci, A., Cavicchioli, M., Cintorrino, I. A. et al. (2021), «Smart Textiles and Sensorized Garments for Physiological Monitoring: A Review of Available Solutions and Techniques», *Sensors*, Vol. 21, No. 3, pp. 814. <https://doi.org/10.3390/s21030814>.
16. Rothmaier, M., Luong, M., and Clemens, F. (2008), «Textile Pressure Sensor Made of Flexible Plastic Optical Fibers», *Sensors*, Vol. 8, No. 7, pp. 4318–4329. <https://doi.org/10.3390/s8074318>.
17. Kirstein, T. (2013), «The future of smart-textiles development: new enabling technologies, commercialization and market trends», *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers*. Woodhead Publishing, pp. 92–128. <https://doi.org/10.1533/9780857093530.1>.
18. Ruckdashel, R. R., Venkataraman, D. and Park, J. H. (2021), «Smart textiles: A toolkit to fashion the future», *Journal of Applied Physics*, Vol. 129, No. 13, pp. 130903. <https://doi.org/10.1063/5.0024006>.
19. Gong, Z., Xiang, Z., OuYang, X. et al. (2019), «Wearable Fiber Optic Technology Based on Smart Textile: A Review», *Materials*, Vol. 12, No. 20, pp. 3311. <https://doi.org/10.3390/ma12203311>.
20. Zaman, S. U., Tao, X., Cochrane, C. (2021), «Smart E-Textile Systems: A Review for Healthcare Applications», *Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 99. <https://doi.org/10.3390/electronics11010099>.
21. Taj-Eldin, M., Ryan, C., O'Flynn, B. (2018), «A Review of Wearable Solutions for Physiological and Emotional Monitoring for Use by People with Autism Spectrum Disorder and Their Caregivers», *Sensors*, Vol. 18, No. 12, pp. 4271. <https://doi.org/10.3390/s18124271>.
22. Chandel, R. S., Sharma, S., Kaur, S. et al. (2022), «Smart watches: A review of evolution in bio-medical sector», *Materials Today: Proceedings*, No. 50, pp. 1053–1066. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.460>.
23. Reeder, B., Cook, P. F., Meek, P. M. (2017), «Smart Watch Potential to Support Augmented Cognition for Health-Related Decision Making», *Springer, Cham*, pp. 372–382. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58628-1_29.

24. Bunn, J. A., Navalta, J. W., Fountaine, C. J., Reece J. D. (2018), «Current State of Commercial Wearable Technology in Physical Activity Monitoring 2015–2017», *International journal of exercise science*, Vol. 11, No. 7, pp. 503–515. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5841672/>.
25. Strik, M., Ploux, S., Ramirez, F. D. et al. (2021), «Smartwatch-based detection of cardiac arrhythmias: Beyond the differentiation between sinus rhythm and atrial fibrillation», *Heart Rhythm*, Vol. 18, No. 9, pp. 1524–1532. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2021.06.1176>.
26. Nazarian, S., Lam, K., Darzi, A. (2021), «Diagnostic Accuracy of Smartwatches for the Detection of Cardiac Arrhythmia: Systematic Review and Meta-analysis», *Journal of Medical Internet Research*, Vol. 23, No. 8, pp. 28974. <https://doi.org/10.2196/28974>.
27. Palmius, N., Tsanas, A., Saunders, K. E. A. et al. (2017), «Detecting Bipolar Depression From Geographic Location Data», *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 64, No. 8, pp. 1761–1771. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2611862>.
28. Ueafuea, K., Boonnag, C., Sudhawiyangkul, T. et al. (2021), «Potential Applications of Mobile and Wearable Devices for Psychological Support During the COVID-19 Pandemic: A Review», *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 6, pp. 7162–7178. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3046259>.
29. Lee, J., Kim, M., Park, H. (2020), «Motion Artifact Reduction in Wearable Photoplethysmography Based on Multi-Channel Sensors with Multiple Wavelengths», *Sensors*, Vol. 20, No. 5, pp. 1493. <https://doi.org/10.3390/s20051493>.
30. Liu, J., Yan, B. P., Dai, W. et al. (2016), «Multi-wavelength photoplethysmography method for skin arterial pulse extraction», *Biomedical Optics Express*, Vol. 7, No. 10, pp. 4313. <https://doi.org/10.1364/BOE.7.004313>.
31. A Guide to the Best Blood Pressure Monitor Watches of 2022. URL : <https://www.healthline.com/health/best-blood-pressure-monitor-watches>.
32. Moon, J. H., Kang, M., Choi, C. et al. (2020), «Validation of a wearable cuff-less wristwatch-type blood pressure monitoring device», *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75892-y>.
33. Hahnen, C., Freeman, C. G., Haldar, N. et al. (2020), «Accuracy of Vital Signs Measurements by a Smartwatch and a Portable Health Device: Validation Study», *JMIR mHealth and uHealth*, Vol. 8, No. 2, pp. 16811. <https://doi.org/10.2196/16811>.
34. Sharma, M., Kacker, S. and Sharma, M. (2016), «A Brief Introduction and Review on Galvanic Skin Response», *International Journal of Medical Research Professionals*, Vol. 2, No. 6, pp. 254–257. <https://doi.org/10.21276/ijmrp.2016.2.6.003>.
35. Fitbit debuts Sense, its most advanced health smartwatch; world's first with EDA sensor for stress management, plus ECG app, SpO₂ and skin temperature sensors, 2020. URL: <https://investor.fitbit.com/press-releases/press-release-details/2020/Fitbit-Debuts-Sense-Its-Most-Advanced-Health-Smartwatch-Worlds-First-With-EDA-Sensor-for-Stress-Management-Plus-ECG-App-SpO2-and-Skin-Temperature-Sensors/default.aspx> (date of application: 01.02.2022).
36. Debard, G., Witte, N. D., Sels, R. et al. (2020), «Making Wearable Technology Available for Mental Healthcare through an Online Platform with Stress Detection Algorithms: The Carewear Project», *Journal of Sensors*, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/8846077>.
37. Affanni, A. (2020), «Wireless Sensors System for Stress Detection by Means of ECG and EDA Acquisition», *Sensors*, Vol. 20, No. 7, pp. 2026. <https://doi.org/10.3390/s20072026>.
38. Banganho, A. R., Santos, M. B. and Silva, H. P. (2021), «Design and Evaluation of an Electrodermal Activity Sensor (EDA) With Adaptive Gain», *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 6, pp. 8639–8649. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3050875>.
39. Siirtola, P. (2019), «Continuous stress detection using the sensors of commercial smartwatch», *UbiComp/ISWC '19 Adjunct: Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers September*, pp. 1198–1201. <https://doi.org/10.1145/3341162.3344831>
40. Kamisalic, A., Fister, I., Turkanovic, M. (2018), «Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review», *Sensors*, Vol. 18, No. 6, pp. 1714. <https://doi.org/10.3390/s18061714>.
41. Angelides, M. C., Wilson, L. A. C., Echeverria, P. L. B. (2018), «Wearable data analysis, visualisation and recommendations on the go using android middleware», *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 77, No. 20, pp. 26397–26448. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5867-y>.
42. Tharion, W. J., Kaushik, S. (2006), «Usariem Technical Report T07-04: Graphical user interface (GUI) for the warfighter physiological status monitoring (WPSM) system – U.S. army medic recommendations», *Biophysics and Biomedical Modeling Division*. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA459019.pdf>. <https://doi.org/10.21236/ADA459019>.

ORCID ID співавторів та їхній внесок у підготовку та написання статті:

Ніколов М. О. (ORCID ID 0000-0001-8716-6254) – проведення літературного пошуку, систематизація даних, формулювання висновків, написання проекту статті;

Соловійов О. І. (ORCID ID 0000-0002-1226-9715) – ідея розробки наукового напряму, вступ, формулювання мети, аналіз й узагальнення результатів дослідження, формулювання висновків;

Бурковський Є. О. (ORCID ID 0000-0003-1867-9421) – участь у редагуванні й оформленні статті, обговорення результатів дослідження, участь у літературному пошуку в підрозділі «розумні годинники».

Інформація щодо джерел фінансування дослідження: дослідження виконано за темою «Розробка організаційних основ та методичних підходів для впровадження технології телебіометрії та сенсорних мереж у сфері медицини праці в ризиконебезпечних галузях виробництва», № державної реєстрації 0122U000649.

Надійшла: 10 травня 2022 р.

Прийнята до друку: 31 травня 2022 р.

Контактна особа: Ніколов М. О., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра електронної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», буд. 37, просп. Перемоги, м. Київ, 03056. Тел.: + 38 067 246 68 17.
Електронна пошта: nicholay.nikolov@gmail.com