

# ИШЕМИЯЛЫҚ ЖҮРЕК АУРУЫ ҚАУПІН ЖҮРЕК СОҒУ ЫРҒАҒЫНЫҢ ВАРИАБЕЛДІЛІГІН БЕЙСЫЗЫҚ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ ТАҒЫЛАТЫН ҚҰРЫЛҒЫЛАР ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША БОЛЖАУ

М. И. Кожамбердиева<sup>1</sup>, А. М. Раушанова<sup>1</sup>, З. Абдрахманова<sup>2\*</sup>, Л. Оракбай<sup>2</sup>,  
Ж. Д. Тулеков<sup>1</sup>, А. И. Байдаулетова<sup>1</sup>, Е. Э. Дүйсенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті», Қазақстан, Алматы

<sup>2</sup> МЕББМ «Қазақстан-Ресей медициналық университеті», Қазақстан, Алматы

\* Корреспондент автор

## Аңдатпа

*Кіріспе.* Ишемиялық жүрек ауруы әлем бойынша өлім-жітімнің жетекші себептерінің бірі болып табылады, бұл халық арасында қолжетімді және инвазивті емес скрининг құралдарын енгізудің өзектілігін арттырады.

*Зерттеудің мақсаты* – тағылатын фотоплетизмографиялық құрылғы негізінде жүрек соғу ырғағының вариабелділігі параметрлерін қолданып, ишемиялық жүрек ауруы қаупін бағалау мүмкіндігін зерттеу.

*Материалдар мен әдістер.* Зерттеу барысында фотоплетизмографияға негізделген, саусаққа тағылатын «Zhurek» IoT құрылғысы құрастырылды; құрылғы жүрек соғу ырғағының вариабелділігін нақты уақытта есептейді. «Zhurek» көрсеткіштері үш-қорғасындық Холтерлік электрокардиография деректерімен салыстырылды, ал ангиографиялық түрде диагнозы расталған пациенттер мен сау еріктілерден алынған деректерге машиналық оқыту алгоритмдері қолданылды.

*Нәтижелер.* Холтерлік электрокардиографиямен салыстырғанда жаңа құрылғының өлшеу нәтижелеріндегі ауытқулар клиникалық тұрғыдан қолайлы деңгейде болды; жүрек соғу ырғағының вариабелділігі параметрлері, әсіресе төмен жиілікті қуат және пациенттің жасы, ишемиялық жүрек ауруын айқындаудың негізгі дискриминациялық көрсеткіштері ретінде анықталды.

*Қорытынды.* «Zhurek» құрылғысы ишемиялық жүрек ауруы қаупін ауқымды стратификациялауға жарамды және денсаулық сақтауда аурудың пайда болуын күтуден оны ерте алдын алуға бағытталған проактивті модельге көшуге мүмкіндік бере алады.

*Түйін сөздер:* ишемиялық жүрек ауруы, жүрек соғу жиілігінің өзгергіштігі, фотоплетизмография, жүрек-қантaмыр аурулары, машиналық оқыту.

## Кіріспе

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының деректері бойынша, 2019 жылы жүрек-қантaмыр аурулары салдарынан 17,9 миллион адам қайтыс болды, бұл ғаламдық өлімдердің 32% үлесін құрады; олардың 85% миокард инфаркті мен инсультке тиесілі. Сол жылы жұқпалы емес аурулардан болған 17 миллион мерзімінен бұрын өлімнің 38% жүрек-қантaмыр аурулары үлесінде [1]. Ишемиялық жүрек ауруы (әрі қарай – ИHD) жүрек-қантaмыр аурулары

құрылымында кең таралған нысандардың бірі және өлімнің ауқымды себептерінің қатарында [2]. Қазақстанда 2022 жылғы мәліметке сәйкес, ересектер арасында қанайналым жүйесі аурулары ең көп таралған: 100 мың халыққа 3 962,5 жағдай, соның ішінде ИHD 100 мың халыққа 560,7 жағдайды құрайды. Бұл көрсеткіштер елдегі жүрек-қантaмыр патологиясында ИHD жүктемесінің жоғары екенін дәлелдейді [3]. ИHD бүкіл әлемде жеке адамдар мен денсаулық сақтау жүйелеріне айтарлықтай ауыртпалық

түсіреді, өлім мен мүгедектікке әкеледі. Атеросклерозбен байланысты коронарлық артерия ауруы (әрі қарай – CAD) миокард ишемиясымен клиникалық түрде көрінетін ИHD негізгі себебі. Патофизиологияның өзегі – миокард перфузиясын шектейтін коронарлық артериялардың обструктивті атеросклерозы [4]. Денсаулық сақтау жүйесіне сұраныс артып келе жатқандықтан, миокард инфарктісі немесе созылмалы жүрек жеткіліксіздігі (әрі қарай – CHF) сияқты қайтымсыз асқынуларға дейін ИHD ерте анықтау үшін диагностикалық тәсілдер қажет [5; 6]. Жүрек соғу жиілігінің өзгергіштігі (әрі қарай – HRV) жүрек соғу жиілігі арасындағы уақыттың өзгеруін білдіреді [7]. Ритмді бақылау арқылы инвазивті емес жолмен алынатын HRV – ағзаның жалпы физиологиялық жай-күйі туралы маңызды ақпарат, жүректің бейімделу қабілетін және қоршаған ортаның өзгерістеріне компенсаторлық механизмдер арқылы жауап беру мүмкіндігін көрсетеді [8]. HRV көрсеткіштері вегетативтік жүйке жүйесінің (әрі қарай – ANS) тікелей ықпалымен, парасимпатикалық тармақ арқылы қалыптасады және симпатикалық пен парасимпатикалық белсенділіктің біріктірілген әсерін бейнелейді. HRV төмендеуі миокард инфаркті, атеросклероздың үдеуі, жүрек жеткіліксіздігі, ИHD және кенеттен өлім сияқты теріс оқиғалармен байланыстырылған [6; 9]. Сол себепті HRV талдауы ANS функциясын бағалауға көмегін тигізеді. Қазіргі таңдағы диагностикалық рәсімдер коронарлық патологияны бағалауда қымбат, инвазивті және ишемияның өршуін уақытылы анықтауда тиімді емес. Диагностикалық коронарлық ангиография жүрек-қан тамырлары аномалияларын дәл ашып көрсеткенімен, оның құны жоғары, процедура барысында қауіптері бар және мамандардың жоғары біліктілігін талап етеді [10; 11]. Дәстүрлі диагностикалық әдістер уақытты талап етеді, адами қателіктерге бейім және қате жіктемеге әкелуі мүмкін, бұл шығын мен еңбек жүктемесін арттырады [12]. Осы шектеулерге байланысты сенімді, инвазивті емес және ерте анықтауға мүмкіндік беретін жаңа тәсілдерге деген сұраныс артып отыр. HRV-ге негізделген әдістер осы бағытта әлеует көрсетуде. Дәстүр бойынша жүрек-қантaмыр жүйесін бағалау электрокардиография (әрі қарай – ECG) арқылы жүзеге асырылады, ол жүректің электрлік

белсенділігін терідегі электродтар арқылы тіркейді [13]. Соңғы онжылдықта үздіксіз, ыңғайлы және үнемді мониторингке сұраныс артып, балама әдістерді іздеу күшейе түсті. Фотоплетизмография (PPG) өзінің қарапайым аппараттық құралдарымен және тұтынушы құрылғыларына оңай интеграциялануымен ерекше көзге түсті [14]. Клиникалық және үй жағдайында PPG ECG-ге қарағанда жүректі үздіксіз бақылау үшін әлдеқайда арзан және қолайлы балама ұсынады [15; 16].

Дәлдігі жоғары болғанымен, дәстүрлі ECG жүйелері клиникалық бақылауды, электродтарды мұқият орналастыруды және тұрақты калибрлеуді талап етеді, бұл шығынды өсіріп, пайдаланушыға қолайсыздық тудырады [7]. Микроэлектроника мен сенсорлық технологиялардағы ілгерілеу PPG сенсорларын шағындатты, оларды білезіктерге, смарт-сағаттарға, смартфондар мен құлақшiлік құрылғыларға енгізу мүмкін болды, осылайша үздіксіз жүрек-қантaмыр мониторингіне кең қолжетімділік ашылды [17]. PPG-ді сымсыз дерек жіберу протоколдарымен және бұлттық аналитикамен біріктіру құндылық, тасымалданымдылық және қолайлылықты бір алаңда тоғыстырып, дәстүрлі ECG конфигурацияларымен салыстырғанда айқын артықшылық береді [18]. Жүрек соғу жиілігінің өзгергіштігі мен жүрек-қантaмыр аурулары арасындағы байланыс белгілі болғанымен, тұтынушылық деңгейдегі фотоплетизмография сенсорларын пайдаланып ишемиялық жүрек ауруын скринингтен өткізуге арналған практикалық әдістеме әлі нақты қалыптасқан жоқ және мұндай құрылғылардан алынатын ақпаратты HRV биомаркерлері біржолата айқындалмаған. Осы тапшылықты толтыру үшін саусақ ұшына арналған Zhurek PPG құрылғысын ұсынамыз. Бұл құрылғы жүрек соғу ырғағының вариабелділігі метрикаларын құрылғының өзінде, нақты уақыт режимінде есептеп, алынған нәтижелерді бұлттық қоймаға қауіпсіз түрде жібереді. Үш қорғасындық Холтер ЭКГ-мен жүргізілген салыстырмалы сынақтар нәтижесінде орташа айырмашылықтар клиникалық тұрғыдан қолайлы деңгейде екені анықталды: Жүрек соғу жиілігі үшін 0.601 сок/мин, SDNN үшін +33.1 мс және RMSSD үшін –4.8 мс. Zhurek көмегімен Қазақстан, Алматы

қаласындағы Кардиология орталығында 18-70 жастағы 20 сау ерікті мен ангиографиялық түрде расталған ИHD бар 20 пациенттен HRV деректері жиналды. Қатысушылардың сегіз белгісі қарастырылды, олар: SDNN, RMSSD, LF, HF, LF/HF, Max\_HR, BMI және жас. Mann-Whitney сынақтары SDNN, LF, Бұл пилоттық нәтижелер қолжетімді PPG платформасы арқылы негізгі HRV сипаттамаларын сенімді алуға болатынын көрсетеді. HF, Max\_HR, BMI және жас көрсеткіштері бойынша топтар арасындағы айырмашылықтардың мәнді екенін растады ( $p < 0.05$ ). Негізгі компоненттер талдауы алғашқы екі компоненттің дисперсияның 49.5 % түсіндіретінін және меткелерсіз-ақ когорттарды ажырата алатынын көрсетті. CatBoost арқылы белгілер маңыздылығының рейтингі бойынша LF қуаты ең жоғары үлеске ие болды (~44 %), одан кейін жас (~19 %) және HF қуаты келді, ал Max\_HR мен RMSSD ықпалы салыстырмалы түрде аздау болды. Әдіс 24 сағаттық Холтерді «алтын стандарт» ретінде алмастыруға арналмағанымен, HRV талдауы үшін төмен құнды тағылатын құрылғылардың әлеуетін айқындап, ИHD-ті скринингтеу және мониторингтеуге арналған ауқымды әрі үнемді жүйелерді дамытуға негіз қалайды.

Зерттеудің мақсаты тағылатын фотоплетизмографиялық «Zhurek» IoT құрылғысынан алынатын жүрек соғу ырғағының вариабелділігі көрсеткіштерін пайдаланып, ишемиялық жүрек ауруы қаупін бағалау және сау адамдар мен диагнозы ангиографиялық расталған пациенттерді ажыратуда олардың диагностикалық маңыздылығын анықтау.

Зерттеуде алғаш рет Қазақстан жағдайында саусаққа тағылатын фотоплетизмографиялық IoT құрылғысы («Zhurek») арқылы қысқа уақыттық жүрек соғу ырғағының вариабелділігі параметрлерін жинақтап, оларды үш-қорғасындық Холтер ЭКГ деректерімен салыстыру, сондай-ақ LF қуаты, жас және басқа HRV көрсеткіштерінің ишемиялық жүрек ауруы қаупін стратификациялаудағы рөлін машиналық оқыту әдістері негізінде кешенді бағалау ұсынылады.

### Материалдар мен әдістер

Зерттеу пилоттық зерттеу форматында «Алматы қалалық кардиология орталығы» базасында, Алматы, Қазақстан, 2025 жылғы

қаңтардан мен маусым аралығында, күндізгі уақытта (сағат 9:00-17:00) жүргізілді. Зерттеу жұмысы гранттық қаржыландыру «Жүрек-қантамыр ауруларын бақылау және олардың алдын алу үшін терең оқыту әдістері мен медициналық заттар интернеті (IoMT, Internet of Medical Things) негізінде интеллектуалды мониторинг жүйесін әзірлеу» атты ғылыми жоба аясында орындалды. Зерттеу хаттамасы «Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті» жанындағы Локалдық этикалық комитетте қарастырылып, мақұлданды, хаттама № IRB-A862, 16.07.2024 ж. Барлық қатысушылар зерттеуге қатысуға және дербес деректерін өңдеуге ерікті ақпараттандырылған келісім берді. Клиникалық топтың пациенттері ишемиялық жүрек ауруы бойынша тексерілу және емделу мақсатында «Алматы қалалық кардиология орталығының» кардиология бөлімшесіне жүгінген науқастар арасынан іріктелді.

Қосу критерийлері:

– Жасы 18-80 жас аралығындағы ер және әйел қатысушылар.

– Ишемиялық жүрек ауруы диагнозы ангиографиялық түрде расталған пациенттер немесе жүрек-қантамыр, неврологиялық және метаболикалық аурулары жоқ, өзін сау деп есептейтін еріктілер.

– Зерттеу хаттамасымен танысып, жазбаша ерікті ақпараттандырылған келісім берген тұлғалар.

Шығару критерийлері:

– Жедел инфекциялық немесе декомпенсацияланған созылмалы аурулардың болуы.

– Жүрек ритмін айқын бұзатын аритмиялар, ауыр жүрек жеткіліксіздігі немесе басқа ауыр жүрек-қантамыр патологиялары.

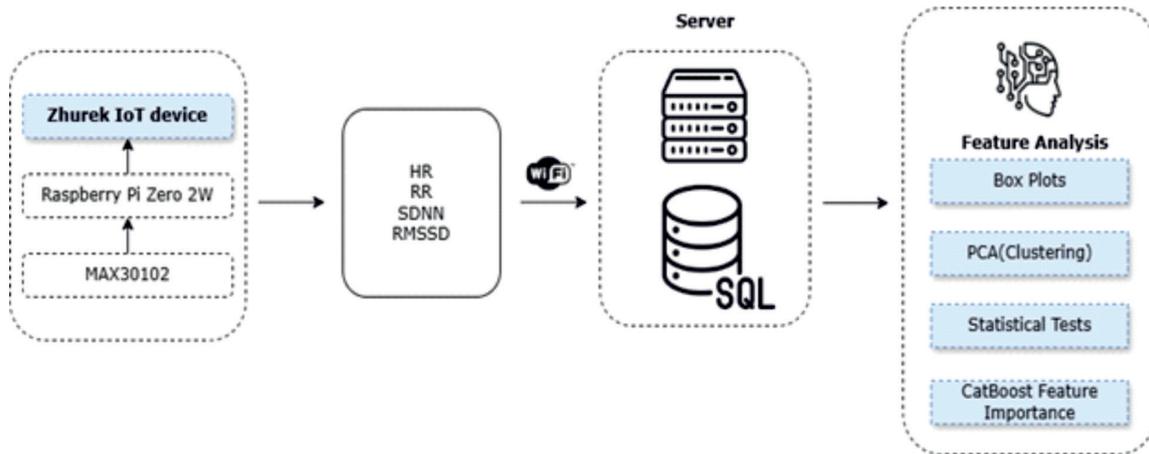
– Зерттеуге дайындық талаптарын (алкоголь, кофеин, шылым шегуден бас тарту, ұйқы режимі) сақтамау немесе PPG/ЭКГ жазбаларында артефакттардың шамадан тыс болуы.

Алдын ала өңделген HRV белгілері JavaScript Object Notation (әрі қарай – JSON) пішіміне оралып, Wi-Fi арқылы MQTT протоколымен жіберіледі. Деректер орталық сервердегі Mosquitto 2.0 брокері басқаратын zhurek/ppg/hrv тақырыбына жарияланады. Байланыс арнасының тұтастығы мен құпиялылығын

қамтамасыз ету үшін TLS 1.3 және екіжақты сертификаттық аутентификация қолданылады.

Сақтау қабатында MQTT хабарламалары талданып, реляциялық SQL дерекқорына жазылады. Әр жазба құрылғылар арасындағы уақыт сәйкестігін сақтау үшін Network Time Protocol

арқылы мерзімді синхрондалып тұратын ішкі нақты уақыт сағатымен танбаланады. Қосымша түрде, байланыс үзілістерінде деректердің жоғалуын болдырмау үшін құрылғы жергілікті CSV журналын жүргізеді.



**Сурет 1.** Гибридті физиологиялық мониторинг жүйесінің архитектурасы (Zhurek PPG, MQTT, SQL, бұлттық аналитика, HRV).

*Дереккөз: авторлармен құрастырылған*

Зерттеушілік талдау кезеңінде мақсатымыз – болжам құрудан бұрын, дені сау адамдарды ІНД бар қатысушылардан ажыратуға ең ықпалды физиологиялық және мінез-құлықтық айнымалыларды анықтау. Ол үшін үлестірімдер айырмасын бағалау үшін Mann-Whitney U сынағын, ал меткасыз латентті құрылымды және топтардың бөлінуін зерделеу үшін Негізгі Компоненттер Талдауын (PCA) қолдандық. 40 үлгіден тұратын пилот деректерінде CatBoost арқылы белгілер маңыздылығы есептелді, HRV және клиникалық айнымалылардың ішінде ең күшті дискриминациялық сигналдар LF қуаты, жас, HF қуаты және Max\_HR бойынша байқалды. ІН-дің тартымдылығын ескере отырып, шамадан тыс оқыту мен қате түсіндіруден аулақ болу үшін өнімділік көрсеткіштері әдейі келтірілмеді, назар кейінгі ауқымды зерттеулер үшін гипотезаларды қалыптастыруға бағытталды.

Қауіптің ықтимал деңгейін бағалайтын талдау-классификация деңгейінде сақталған HRV белгілері ІНД-мен байланысты автономдық дисфункция тәуекелін болжау үшін пайдаланылады. Пакеттік конвейерлер белгіленген деректер негізінде бірнеше машиналық оқыту

модельдерін (XGBoost, CatBoost, Random Forest, Explainable Boosting Machine, Deep Neural Network және Least-Mean-Square Support Vector Machine) пайдалана отырып, біріктірілген гибридті тәсілмен оқытылады. Бұл модельдер тәуекелді стратификациялауды және ерте дисфункциялық үлгілерді анықтауды қамтамасыз етеді. Осындай схема қашықтан мониторинг жүргізу жағдайында алдын ала автоматтандырылған бағалауды, денсаулық көрсеткіштерін үздіксіз бақылауды және триаж үдерістерін қолдайды.

Ендірілген өңдеуді, қорғалған сымсыз жеткізуді және модульдік аналитиканы тоғыстыра отырып, жүйе үздіксіз өлшеу мен құрылымдалған интерпретацияны қамтамасыз етеді. Ашық бастапқы кодты құралдар мен нарықтағы дайын компоненттерге сүйену қайта өндіруді жеңілдетіп, қашықтан мониторинг сценарийлеріне енгізуді оңайлатады.

Zhurek –нақты уақытта фотоплетизмографиялық сигналдарды алу және өңдеу үшін арнайы жасалған, инвазивті емес тағылатын құрылғы. Ықшам пішіні, толық біріктірілген электроникасы және құрылғыда орындалатын аналитикасы клиникадан тыс ұзақ мерзімді амбулаторлық қолдануға лайық.

Құрылымында MAX30102 оптикалық сенсоры (DFRobot Gravity: SEN0344) және Raspberry Pi Zero 2 W (ARM Cortex-A53, 1 ГГц, 512 МБ ЖЖК) бар, операциялық жүйе – 64-биттік Raspberry Pi OS Lite. Сигнал жинақтауда тек инфрақызыл (IR) арна қолданылады, іріктеу жиілігі 100 Гц, аппараттық ІС шинасы арқылы (мекенжайы 0x57). Сенсор 3D-басылған PLA қаптамада орналасқан; IR-қорғалған саусақ қыстырғышы және жұмсақ эластомер төсемі қозғалыс артефактілері мен сыртқы жарық әсерін төмендетеді.

Деректерді жинау мен өңдеу толықтай Python 3.11 тілінде жазылған; ІС алмасуды smb2 кітапханасы атқарады. Бастапқы PPG сигналы трендтен босатылып, жылжымалы орташа сүзгімен тегістеледі. HeartPy негізіндегі туындыға (деривацияға) сүйенген шыңдарды анықтау алгоритмі жүрек циклдерін табады, одан кейін физиологиялық валидтеу арқылы артефакттар шығарып тасталады. RR интервалдары шыңдардың уақыттық меткелерінен есептеледі. Уақыт доменіндегі HRV метрикалары – жүрек соғу жиілігі (әрі қарай – HR), SDNN және RMSSD – 30 секундтық терезеде, 5 секунд қадаммен есептеледі. Жиілік доменіндегі көрсеткіштер (LF, HF, LF/HF) және Max\_HR офлайн түрде алынып, антропометриялық белгілермен (BMI, жас) бірге сегіз өлшемді векторға біріктіріледі.

Әрбір нәтиже JSON объектісіне айналдырылып, MQTT арқылы жарияланады. Тірі телеметриямен қатар, құрылғы желі үзілістеріне төзімділік үшін жергілікті CSV журналын жүргізеді. Барлық жазбалар нақты уақыт сағаты (әрі қарай – RTC) арқылы уақыт-таңбаланады; ол құрылғылар синхронын сақтау мақсатында NTP арқылы мерзімді жаңартылып отырады.

HRV үшін қалыпты автономдық жағдайда физиологиялық базалық деңгейді белгілеу мақсатында дені сау еріктілерден деректер жиналды. Қатысушылар жүрек-қан тамыр, неврологиялық немесе метаболикалық аурулар бойынша анамнезінің жоқ екенін хабарлады. Ықпал етуші факторларды азайту үшін қатысушыларға деректер жинауға дейінгі кемінде 24 сағат бойы алкоголь, темекі, кофеин және қарқынды физикалық белсенділіктен бас тарту, сондай-ақ алдыңғы түні 7–8 сағат қалыпты ұйқы режимін сақтау тапсырылды.

Шығару критерийлері: жедел сырқат, дайындық талаптарына сай келмеу немесе сигнал жазбаларында артефакттардың шамадан тыс болуы.

Өлшеулер үш-қорғасындық ECG Холтері және MAX30102 PPG сенсоры Raspberry Pi Zero 2 W микроконтроллерімен біріктірілген Zhurek IoT құрылғысы арқылы жүргізілді. Инфрақызыл PPG арнасы саусақ ұшына қорғалған қыстырғышпен бекітілді, іріктеу жиілігі 100 Гц, аппараттық ІС шинасы арқылы жүзеге асырылды. Құрылғыда нақты уақытта 30 секундтық сырғымалы тереземен HRV белгілері есептелді: жүрек соғу жиілігі (HR), RR интервалдары, SDNN және RMSSD. Барлық өлшемдер кейінгі өңдеуге арналған жоғары дәлдікпен уақыт-таңбаланып, CSV пішімінде сақталды.

Осы пилоттық зерттеуде алдын ала өңдеу екі бөлек топтың деректерін біріктіруді қамтыды: сау бақылау тобы және ишемиялық жүрек ауруы бар клиникалық топ. Сау бақылау тобына жасы 18-22 аралығындағы 20 ересек енгізілді. ИHD тобы 18-92 жас аралығын қамтитын, диагнозы ангиографиялық расталған дәл 300 пациенттен тұратын үлкен базадан іріктелді; осы талдау үшін 18-71 жас аралығындағы 20 пациент қалдырылды. Уақытша ажыратымдылықты біріздендіру мақсатында әрбір ИHD пациентінің 24 сағаттық ECG Холтер жазбасынан HRV-дің үздіксіз 1 сағаттық бөлігі алынды және ол Zhurek құрылғысымен жиналған сау қатысушылардың 1 сағаттық PPG жазбаларымен сәйкестендірілді.

*Статистикалық талдау.* Деректерді статистикалық өңдеу үшін сипаттамалық статистика (медиана, квартильдер, пайыздық үлестер) есептелді. Тәуелсіз екі топты (сау еріктілер және ИЖА бар пациенттер) салыстыруда үлестірімнің нормалдылығына байланысты параметрлік емес Mann-Whitney U критерийі қолданылды,  $p < 0,05$  мәні статистикалық мәнділік шегі ретінде қабылданды.

Айнымалылардың өзара байланысын бағалау үшін корреляциялық матрицалар құрастырылып, физиологиялық, өмір салты және HRV көрсеткіштерінің арасындағы корреляциялар талданды. Негізгі компоненттер талдауы (PCA) деректердің өлшемділігін азайту және жасырын құрылымды, сондай-ақ сау және ИЖА топтарының ажыратылуын визуализациялау мақсатында пайдаланылды.

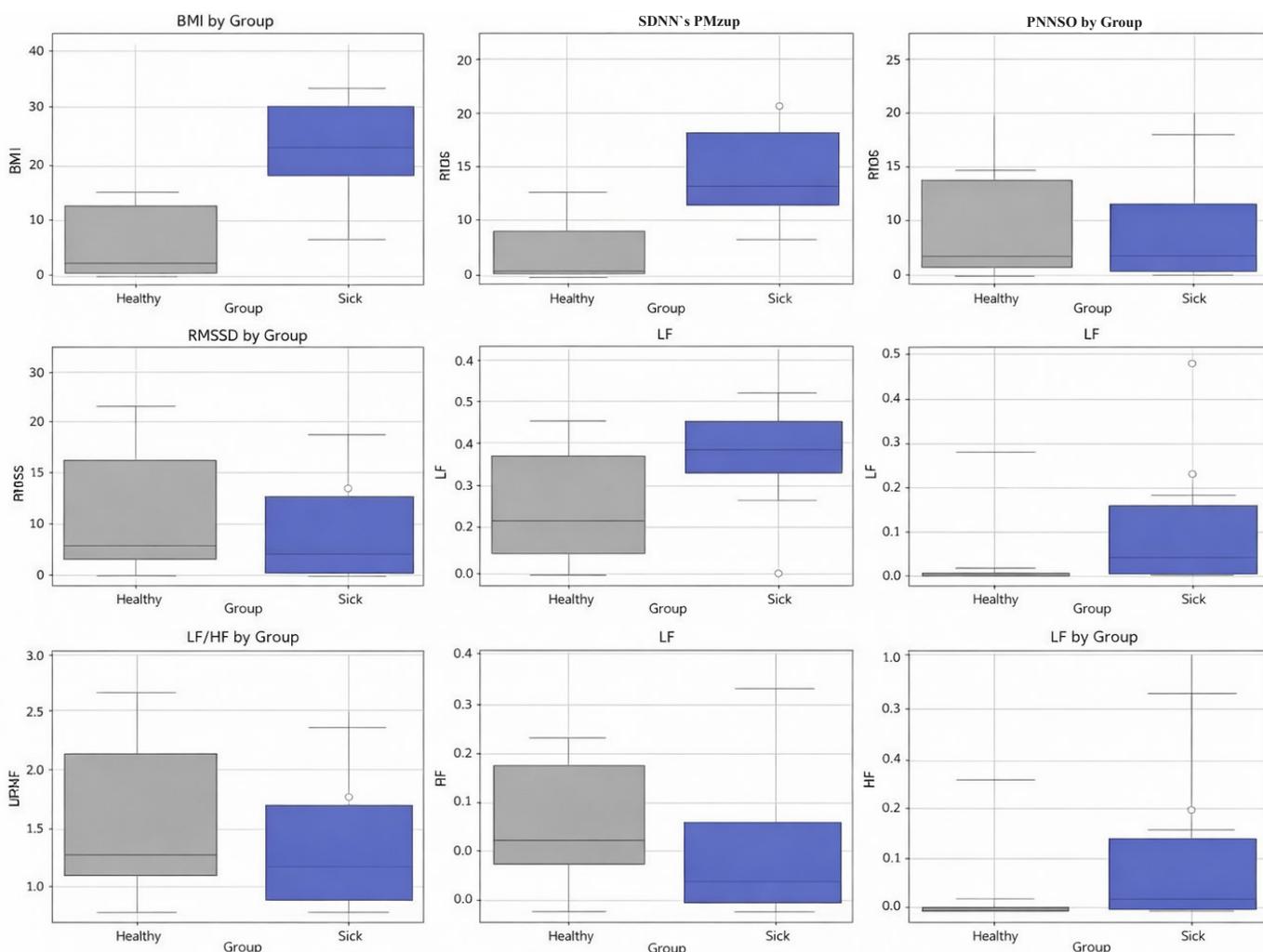
Белгілердің (факторлардың) дискримина-

циялық маңыздылығын бағалау үшін CatBoost машиналық оқыту алгоритмі қолданылып, LF қуаты, жас, HF қуаты, Max\_HR және RMSSD сияқты HRV және клиникалық айнымалылардың үлесі анықталды; модель өнімділігінің метрикалары шағын таңдаманы ескере отырып, артық үйренуді болдырмау үшін есептелмеді.

**Нәтижелер**

2-суретте, бокс-диаграммалар негізгі физиологиялық және HRV-негізді көрсеткіштер бойынша айқын топтық айырмашылықтары көрсетілген. IHD тобы SDNN мәндерінің жоғарылауын, LF және HF диапазондарының артуын көрсетеді, бұл жалпы вариабелділік пен спектрлік энергияның екі жолақта да

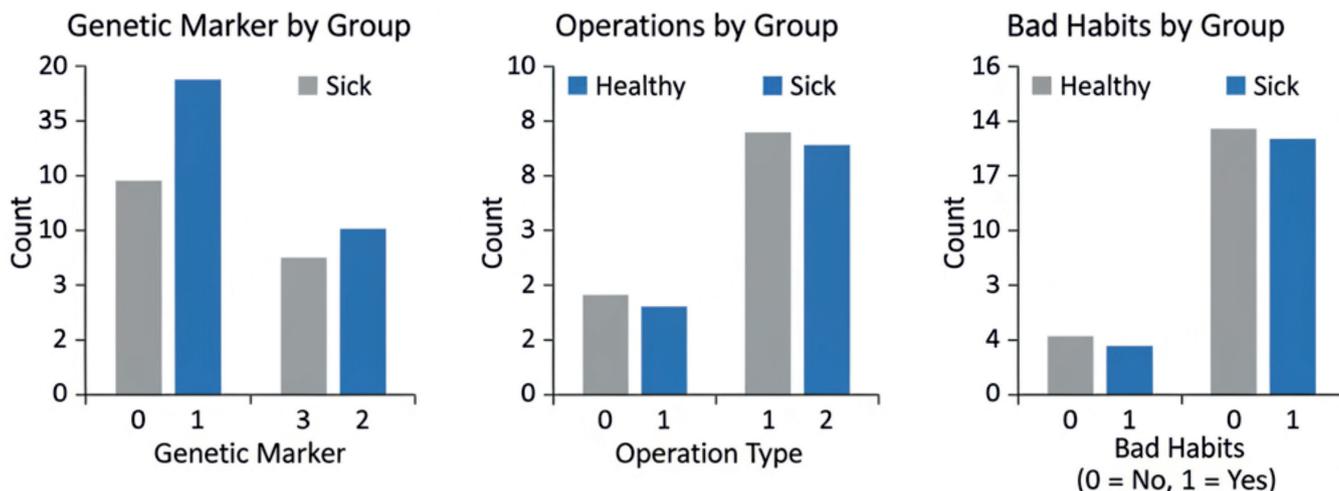
жоғары екенін білдіреді. Парасимпатикалық белсенділікпен байланысты RMSSD [19] сау қатысушыларда жоғары болды, бұл вегетативтік реттелудің икемдірек екенін көрсетеді, себебі RMSSD-нің жоғары мәндері әдетте төмен мәндерге қарағанда автономдық бақылаудың бейімделгіштігін білдіреді [20]. LF/HF қатынасы екі топта да елеулі өзгеріссіз қалып, медианалық деңгейлері шамалас. Max\_HR IHD тобында жоғарырақ тіркелді. BMI көрсеткіші топтар арасында аздаған айырмашылығы бар, IHD тобында медианасы жоғары, бұл артық дене салмағының жүрек-қантамыр қаупіндегі орнықты рөлімен сәйкес [21].



**Сурет 2.** Негізгі физиологиялық және HRV көрсеткіштерінің бокс-диаграммалары (SDNN, RMSSD, LF, HF, LF/HF, Max\_HR, BMI): сау топ пен IHD тобының салыстыруы  
 Дереккөз: авторлармен құрастырылған

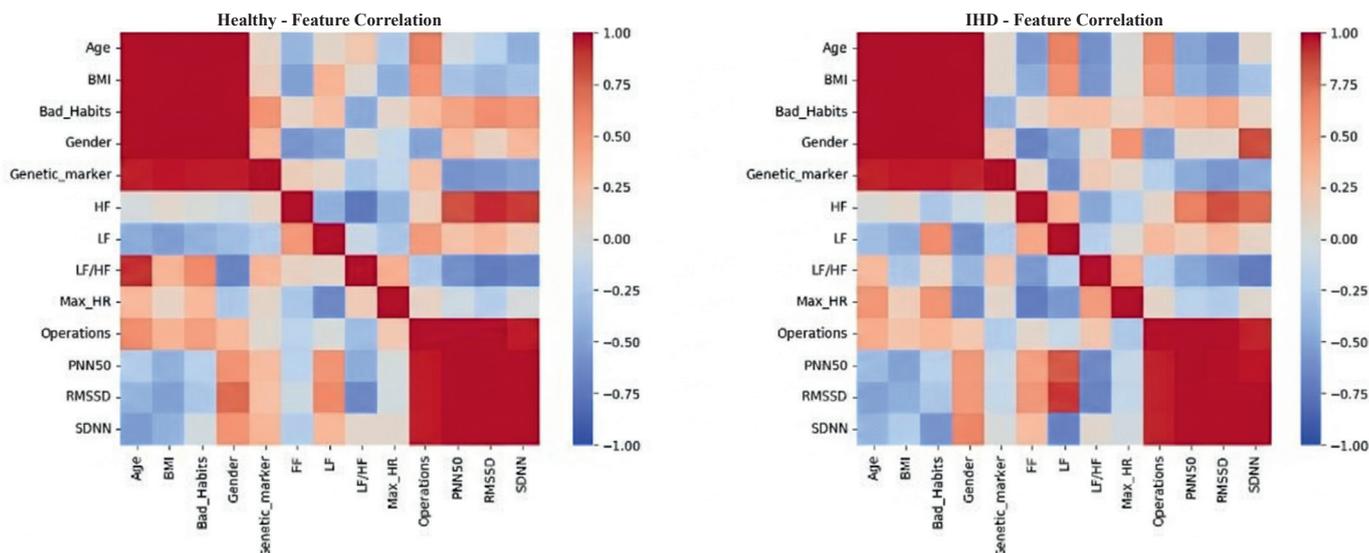
3-суретте көрсетілгендей, категориялық айнымалылардың үлестірімдері сау топ пен ИHD бар қатысушылар арасындағы өмір салты мен клиникалық ерекшеліктердің айқын айырмасын көрсетеді. Генетикалық маркер айнымалысы бойынша сау қатысушылардың басым бөлігі 0 сыныбына жатады (жүрек-қантамыр аурулары бойынша отбасылық анамнездің болмауы), ал ИЖА тобы негізінен 1 сыныбымен кодталған (отбасында жүрек-қантамыр патологиясының болуы). Бұл нәтижелер ЖҚА дамуындағы тұқым қуалаушылық үлесінің бар екенін қуаттайды [22]. Операциялар айнымалысы бой-

ынша сау тұлғалар көбіне 0 мәніне ие (бұрын хирургиялық араласу жасалмаған), ал ИЖА тобының қатысушылары 1 (жүрек-қантамырлық емес оталар) немесе 2 (жүрек-қантамыр жүйесіне байланысты оталар) мәндерінің жоғары жиілігімен сипатталады. Бұл ИЖА бар адамдарда клиникалық араласулардың жиірек орын алатынын көрсетеді. Зиянды әдеттер санатында темекі шегу, алкоголь тұтыну немесе энергетикалық сусындарды жүйелі пайдалану сияқты мінез-құлықтар (1 коды) ИЖА тобында сау топқа қарағанда айтарлықтай жиірек тіркеледі.



Сурет 3. Категориялық айнымалылардың үлестірімі: генетикалық маркер, операциялар және зиянды әдеттер бойынша сау топ пен ИHD тобының салыстыруы.

Дереккөз: авторлар құрастырған



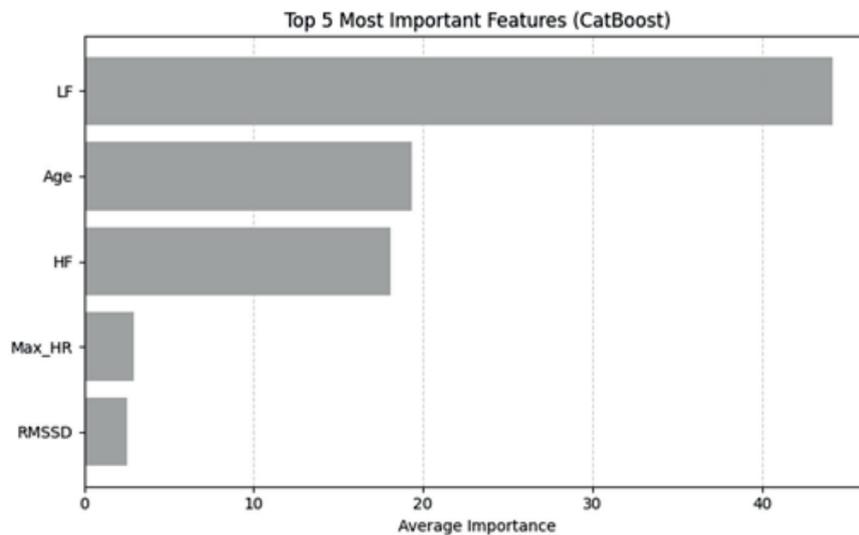
Сурет 4. Сау топ пен ИHD тобындағы физиологиялық, өмір салты және HRV белгілерінің корреляциялық жылу-карталары

Дереккөз: авторлармен құрастырылған

4-суреттегі корреляциялық жылу-карталар физиологиялық, мінез-құлықтық және HRV белгілерінің сау адамдар мен ИHD бар пациенттердегі өзара байланысын көрсетеді. Матрицалар құрылымы екі топта айқын ерекшеленеді: сау топта SDNN, RMSSD және рNN50 сияқты HRV индекстері өзара оң байланыс түзеді, ал ИHD тобында HRV көрсеткіштері арасындағы үйлесім әлсіреп, құрылымы көбірек бұзылған. Зиянды әдеттер санатына жататын өмір салты айнымалылары ИHD тобында HRV-дің нашарлауымен оң байланыс көрсетсе, сау топта HRV белгілерімен теріс байланыс береді. Қызыл диагональ - әр айнымалының өз-өзімен толық корреляциясын білдіретін сызық.

Зерттеу талдау аясында топтарды

ажыратуға ықпал етуі мүмкін физиологиялық және клиникалық айнымалыларды анықтау үшін CatBoost есептеген белгілер маңыздылығы қарастырылды. Осы кезеңде болжау дәлдігі негізгі мақсат болмағанымен, алдын ала бағалау сау және ИHD бар қатысушыларды айыруда ең жоғары әлеуетке ие айнымалыларды айқындады. 6-суретте, CatBoost классификаторы бес маңызды белгіні бөліп көрсетті. HRV-дің LF құрамдасы бірінші орында тұр, оның үлесі шамамен 44 %-ын құрайды. Келесі орында шамамен 19 % үлеспен жас, одан кейін HRV-дің HF диапазоны орын алды. Қосымша екі белгі – Max\_HR және tRMSSD – модельдің жалпы дискриминациялық қабілетіне шамамен 2–3 % деңгейінде үлес қосты.



Сурет 5. CatBoost бойынша ең маңызды белгілердің рейтингі (LF, жас, HF, Max\_HR, tRMSSD)  
Дереккөз: авторлармен құрастырылған

### Талқылау

Бұл зерттеу «Zhurek» IoT құрылғысының ишемиялық жүрек ауруын ерте анықтауда және жүрек соғу ырғағының вариабелділігін бағалауда қолдану мүмкіндігін көрсетті. Алынған нәтижелер фотоплетизмографияға негізделген қолжетімді технологиялардың холтерлік мониторинг немесе инвазивті коронарлық ангиография сияқты қымбат әрі күрделі әдістерге балама бола алатынын көрсетеді [13-17].

Зерттеудің маңызды нәтижелерінің бірі – CatBoost алгоритмі арқылы ишемиялық жүрек ауруы бар пациенттер мен сау адамдарды ажыратуда төмен жиілікті диапазон қуатының айқын рөл атқаруы. Физиологиялық тұрғыдан LF диапазоны симпатикалық және парасимпатикалық

жүйке жүйелерінің бірлескен әсерін сипаттайды және автономдық реттелудің жалпы көрсеткіші ретінде қарастырылады [18]. ИЖА бар топта LF және HF көрсеткіштерінің жоғары болуы вегетативтік тепе-теңдіктің бұзылуын және жүрекке түсетін нейрогуморалдық жүктеменің артуын көрсетуі мүмкін. Бұл деректер жүрек-қантaмыр аурулары кезіндегі автономдық реттелу өзгерістері туралы бұрынғы зерттеулермен сәйкес келеді [7; 18].

Құрылғыны техникалық салыстыру нәтижелері «Zhurek» пен стандартты холтерлік ЭКГ арасындағы айырмашылықтардың клиникалық тұрғыдан қабылданатын деңгейде екенін көрсетті (жүрек соғу жиілігі бойынша < 1 сок/мин). SDNN көрсеткішінің жоғарылауы

(+33,1 мс) PPG сигналының ерекшеліктерімен және пульстік толқынның таралуымен байланысты болуы мүмкін, бұл басқа зерттеулерде де сипатталған [13; 14]. Мұндай айырмашылықтар скринингтік мақсаттар үшін, әсіресе амбулаторлық жағдайда, рұқсат етілетін деңгейде деп есептеледі [15-17].

Машиналық оқыту моделінде жас факторы маңыздылығы бойынша екінші орында тұрды. Бұл заңды нәтиже, себебі жас ұлғайған сайын тамыр серпімділігі төмендеп, ишемиялық жүрек ауруының даму қаупі артады [1-3]. Сонымен бірге жас факторы жүрек соғу ырғағының вариабелділігіне де әсер етеді [18; 19]. Дегенмен HRV көрсеткіштерінің модельде жас факторынан жоғары маңыздылыққа ие болуы ұсынылған тәсілдің тек демографиялық деректерге емес, нақты физиологиялық өзгерістерге негізделгенін көрсетеді.

Сонымен қатар зерттеу топтары арасында жас айырмашылығы байқалды. Пилоттық таңдамада жас бойынша айырмашылықтардың болуы HRV көрсеткіштеріндегі айырмашылықтарға жас факторының да ықпал етуі мүмкін екенін көрсетеді. Осыған байланысты алынған нәтижелер алдын ала сипатта қарастырылып, оларды жас және басқа да ықтимал шатастырушы факторлар бойынша теңестірілген ірі таңдамада растау қажет.

Жастың HRV көрсеткіштеріне әсерін ескере отырып, алдағы зерттеулерде жас бойынша теңестірілген топтарды қалыптастыру немесе көпфакторлы статистикалық түзету қолдану қажет [18; 19]. Бұдан бөлек, амбулаторлық жағдайда PPG сигналына қозғалыс артефактілері әсер етуі мүмкін, сондықтан сигналды өңдеу алгоритмдерін жетілдіру маңызды [13-16].

Соған қарамастан, зерттеу нәтижелері «Zhurek» сияқты IoT шешімдерінің профилактикалық медицинада маңызды орын алуы мүмкін екенін көрсетеді. Дәстүрлі диагностика көбіне клиникалық белгілер пайда болғаннан кейін жүргізілсе, HRV мониторингі вегетативтік өзгерістерді ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді [7; 15; 17]. Бұл жүрек-қан тамыр ауруларының алдын алу саласында ерте араласуға және профилактикалық бағытты күшейтуге жағдай жасайды.

### **Қорытындылар**

Пилоттық зерттеу Zhurek құрылғысымен

жиналған PPG сигналдарынан есептелген HRV көрсеткіштері клиникалық дәлдік талаптарына сай келетінін көрсетті. Үш қорғасындық Холтер ECG-мен салыстырғанда орташа айырмашылықтар мынадай болды: орташа жүрек соғу жиілігі үшін  $-0.601$  соқ/мин, SDNN үшін  $+33.1$  мс және RMSSD үшін  $-4.8$  мс. Жазбалар 20 сау ерікті мен ангиографиялық түрде расталған IHD бар 20 пациенттен алынды, жалпы сегіз белгі есептелді: SDNN, RMSSD, LF, HF, LF/HF, Max\_HR, BMI және жас.

Mann-Whitney U сынағы SDNN, LF, HF, Max\_HR, BMI және жас бойынша  $p < 0.05$  деңгейінде топтар арасындағы статистикалық мәнді айырмашылықтарды көрсетті. PCA нәтижесі алғашқы екі компоненттің дисперсияның 49.5 %-ын түсіндіретінін және меткелерсіз-ақ когорттарды ажырататынын байқатты, бұл таңдалған айнымалылардың ақпараттылығын дәлелдейді. CatBoost бойынша белгілер маңыздылығы LF үлесінің шамамен 44 % екенін көрсетті, одан кейін шамамен 19 % үлеспен жас тұрды, үшінші орында HF, ал Max\_HR мен RMSSD ықпалы салыстырмалы түрде төмен болды. Zhurek-пен қысқа сессиялардың өзінде әдетте 24 сағаттық мониторингті қажет ететін автономдық маркерлерді анықтауға болады, бұл IHD-ті ауқымды және үнемді скринингтеуге негіз қалайды.

Түсіндіру кезінде бірқатар шектеулер ескерілуі тиіс. Бақылау тобында жас ауқымы тар болды, соған қарамастан жас негізгі дискриминаторлардың бірі ретінде көрінді, бұл шатастырушы фактор тәуекелін арттырады. Деректер жиынтығы бар болғаны қырық бақылаудан тұрды, сондықтан артық үйрену мен жаңсақ қорытындыдан сақтану үшін модельдің өнімділік метрикалары әдейі есептелген жоқ.

Келесі кезеңде таңдаманы ұлғайту және HRV маркерлерінің болжамдық құндылығын бағалау әрі анықталған белгілердің қайта өндірілуін растау үшін көпорталықты бойлық зерттеу басталмақ. Сондай-ақ қосымша бейсызық HRV дескрипторларын енгізу және амбулаторлық мониторингте сенімді тәуекел стратификациясын қамтамасыз ету үшін автоматтандырылған аналитиканы кеңейту жоспарланған. Бұл қадамдар Zhurek әдісінің клиникалық маңызын арттырып, күтуден алдын алуға бағытталған IHD профилактикасына көшуге мүмкіндік береді.

**Әдебиеттер тізімі**

1. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs) [Electronic source]. – 2024. – URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (қарау күні: 11.06.2024).
2. Khan M. A., et al. Global epidemiology of ischemic heart disease: Results from the Global Burden of Disease Study // *Cureus*. – 2020. – Vol. 12(7). – Article No. 9349. – DOI: 10.7759/cureus.9349.
3. Severino P., et al. Ischemic heart disease pathophysiology paradigms overview: From plaque activation to microvascular dysfunction // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2020. – Vol. 21(21). – P. 8118. – DOI: 10.3390/ijms21218118.
4. Janicki Ł. J., et al. Comparative analysis of the diagnostic effectiveness of SATRO ECG in the diagnosis of ischemia diagnosed in myocardial perfusion scintigraphy performed using the SPECT method // *Diagnostics*. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 297. – DOI: 10.3390/diagnostics12020297.
5. Duca Ş.-T., et al. Enhancing comprehensive assessments in chronic heart failure caused by ischemic heart disease: The diagnostic utility of Holter ECG parameters // *Medicina*. – 2024. – Vol. 60(8). – Article No. 1315. – DOI: 10.3390/medicina60081315.
6. Banerjee R., Ghose A., Muthana Mandana K. A hybrid CNN–LSTM architecture for detection of coronary artery disease from ECG // *Proceedings of the 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. – Glasgow, UK, 2020. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207044.
7. Wang L., et al. Heart diseases recognition model based on HRV feature extraction over 12-lead ECG signals // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24(16). – Article No. 5296. – DOI: 10.3390/s24165296.
8. Verma L., Srivastava S. A data mining model for coronary artery disease detection using noninvasive clinical parameters // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9(11). – P. 1-6. – DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i11/82653.
9. Gaine S. P., et al. Multimodality imaging in the detection of ischemic heart disease in women // *Journal of Cardiovascular Development and Disease*. – 2022. – Vol. 9(10). – P. 350. – DOI: 10.3390/jcdd9100350.
10. Doolub G., et al. Artificial intelligence as a diagnostic tool in non-invasive imaging in the assessment of coronary artery disease // *Medical Sciences*. – 2023. – Vol. 11(1). – P. 20. – DOI: 10.3390/medsci11010020.
11. Sayadi M., et al. A machine learning model for detection of coronary artery disease using noninvasive clinical parameters // *Life*. – 2022. – Vol. 12(11). – P. 1933. – DOI: 10.3390/life12111933.
12. Ribeiro P., et al. Cardiovascular diseases diagnosis using an ECG multi-band non-linear machine learning framework analysis // *Bioengineering*. – 2024. – Vol. 11(1). – P. 58. – DOI: 10.3390/bioengineering11010058.
13. Moraes J. L., et al. Advances in photoplethysmography signal analysis for biomedical applications // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18(6). – P. 1894. – DOI: 10.3390/s18061894.
14. Elgendi M., et al. The use of photoplethysmography for assessing hypertension // *NPJ Digital Medicine*. – 2019. – Vol. 2. – P. 60. – DOI: 10.1038/s41746-019-0136-7.
15. Almarshad M. A., et al. Diagnostic features and potential applications of PPG signal in healthcare: A systematic review // *Healthcare*. – 2022. – Vol. 10(3). – P. 547. – DOI: 10.3390/healthcare10030547.
16. Kim K. B., Baek H. J. Photoplethysmography in wearable devices: A comprehensive review of technological advances, current challenges, and future directions // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12(13). – P. 2923. – DOI: 10.3390/electronics12132923.
17. Shabaan M., et al. Survey: Smartphone-based assessment of cardiovascular diseases using ECG and PPG analysis // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. – 2020. – Vol. 20. – P. 177. – DOI: 10.1186/s12911-020-01199-7.
18. Shaffer F., Ginsberg J. P. An overview of heart rate variability metrics and norms // *Frontiers in Public Health*. – 2017. – Vol. 5. – P. 258. – DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.
19. Zeng J., et al. High vagally mediated resting-state heart rate variability is associated with superior working memory function // *Frontiers in Neuroscience*. – 2023. – Vol. 17. – Article No. 1119405. – DOI: 10.3389/fnins.2023.1119405.
20. Volpe M., et al. How cardiologists can manage excess body weight and related cardiovascular risk: An expert opinion // *International Journal of Cardiology*. – 2023. – Vol. 381. – P. 101–104. – DOI: 10.1016/j.ijcard.2023.03.054.
21. Kathiresan S., Srivastava D. Genetics of human cardiovascular disease // *Cell*. – 2012. – Vol. 148(6). – P. 1242–1257. – DOI: 10.1016/j.cell.2012.03.001.

## References

1. World Health Organization. (2024). Cardiovascular diseases (CVDs) [Electronic resource]. Retrieved June 11, 2024, from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)).
2. Khan, M. A., et al. (2020). Global epidemiology of ischemic heart disease: Results from the Global Burden of Disease Study. *Cureus*, 12(7), e9349. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.9349>.
3. Severino, P., et al. (2020). Ischemic heart disease pathophysiology paradigms overview: From plaque activation to microvascular dysfunction. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21), 8118. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21218118>.
4. Janicki, Ł. J., et al. (2022). Comparative analysis of the diagnostic effectiveness of SATRO ECG in the diagnosis of ischemia diagnosed in myocardial perfusion scintigraphy performed using the SPECT method. *Diagnostics*, 12(2), 297. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020297>
5. Duca, Ş.-T., et al. (2024). Enhancing comprehensive assessments in chronic heart failure caused by ischemic heart disease: The diagnostic utility of Holter ECG parameters. *Medicina*, 60(8), 1315. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina60081315>.
6. Banerjee, R., Ghose, A., & Muthana Mandana, K. (2020). A hybrid CNN–LSTM architecture for detection of coronary artery disease from ECG. In *Proceedings of the 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8). Glasgow, UK. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207044>.
7. Wang, L., et al. (2024). Heart diseases recognition model based on HRV feature extraction over 12-lead ECG signals. *Sensors*, 24(16), 5296. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24165296>.
8. Verma, L., & Srivastava, S. (2016). A data mining model for coronary artery disease detection using noninvasive clinical parameters. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(11), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i11/82653>.
9. Gaine, S. P., et al. (2022). Multimodality imaging in the detection of ischemic heart disease in women. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 9(10), 350. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcdd9100350>.
10. Doolub, G., et al. (2023). Artificial intelligence as a diagnostic tool in non-invasive imaging in the assessment of coronary artery disease. *Medical Sciences*, 11(1), 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/medsci11010020>.
11. Sayadi, M., et al. (2022). A machine learning model for detection of coronary artery disease using noninvasive clinical parameters. *Life*, 12(11), 1933. DOI: <https://doi.org/10.3390/life12111933>.
12. Ribeiro, P., et al. (2024). Cardiovascular diseases diagnosis using an ECG multi-band non-linear machine learning framework analysis. *Bioengineering*, 11(1), 58. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11010058>.
13. Moraes, J. L., et al. (2018). Advances in photoplethysmography signal analysis for biomedical applications. *Sensors*, 18(6), 1894. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061894>.
14. Elgendi, M., et al. (2019). The use of photoplethysmography for assessing hypertension. *NPJ Digital Medicine*, 2, 60. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0136-7>.
15. Almarshad, M. A., et al. (2022). Diagnostic features and potential applications of PPG signal in healthcare: A systematic review. *Healthcare*, 10(3), 547. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare10030547>.
16. Kim, K. B., & Baek, H. J. (2023). Photoplethysmography in wearable devices: A comprehensive review of technological advances, current challenges, and future directions. *Electronics*, 12(13), 2923. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12132923>.
17. Shabaan, M., et al. (2020). Survey: Smartphone-based assessment of cardiovascular diseases using ECG and PPG analysis. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20, 177. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01199-7>.
18. Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.
19. Zeng, J., et al. (2023). High vagally mediated resting-state heart rate variability is associated with superior working memory function. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1119405. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1119405>.
20. Volpe, M., et al. (2023). How cardiologists can manage excess body weight and related cardiovascular risk: An expert opinion. *International Journal of Cardiology*, 381, 101–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2023.03.054>.
21. Kathiresan, S., & Srivastava, D. (2012). Genetics of human cardiovascular disease. *Cell*, 148(6), 1242-1257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.001>.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПО ДАННЫМ НОСИМЫХ УСТРОЙСТВ.

М. И. Кожамбердиева<sup>1</sup>, А. М. Раушанова<sup>1</sup>, З. Абдрахманова<sup>2\*</sup>, Л. Оракбай<sup>2</sup>,  
Ж. Д. Тулеков<sup>1</sup>, А. И. Байдаулетова<sup>1</sup>, Е. Э. Дуйсенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Казахский национальный университет имени Аль-Фараби», Казахстан, Алматы

<sup>2</sup> НУО «Казахстанско-Российский медицинский университет», Казахстан, Алматы

\**Корреспондирующий автор*

### Аннотация

*Ведение.* Ишемическая болезнь сердца является одной из ведущих причин смертности во всем мире, что подчеркивает актуальность внедрения доступных и неинвазивных методов скрининга среди населения. Исследование было направлено на оценку возможности использования параметров variability сердечного ритма, регистрируемых с помощью носимого фотоплетизмографического устройства, для стратификации риска ишемической болезни сердца.

*Материалы и методы.* В ходе работы было разработано носимое IoT-устройство «Zhurek», надеваемое на палец и основанное на технологии фотоплетизмографии; устройство в режиме реального времени вычисляет показатели variability сердечного ритма. Показатели «Zhurek» сравнивались с данными трехканального холтеровского мониторинга электрокардиографии, а к данным ангиографически подтвержденных пациентов и здоровых добровольцев были применены алгоритмы машинного обучения.

*Результаты.* Отклонения измерений нового устройства по сравнению с холтеровской электрокардиографией находились в клинически приемлемых пределах; параметры variability сердечного ритма, в особенности мощность в низкочастотном диапазоне и возраст пациента, были идентифицированы как ключевые диагностические признаки для выявления ишемической болезни сердца.

*Вывод.* Устройство «Zhurek» может быть использовано для масштабной стратификации риска ишемической болезни сердца и способствует переходу системы здравоохранения от ожидания манифестации заболевания к проактивной, профилактически ориентированной модели.

*Ключевые слова:* ишемическая болезнь сердца, variability сердечного ритма, фотоплетизмография, сердечно-сосудистые заболевания, машинное обучение.

## PREDICTION OF ISCHEMIC HEART DISEASE RISK BASED ON NONLINEAR ANALYSIS OF HEART RATE VARIABILITY FROM WEARABLE DEVICE DATA.

M. I. Kozhamberdiyeva<sup>1</sup>, A. M. Raushanova<sup>1</sup>, Z. Abdrakhmanova<sup>2\*</sup>, L. Orakbay<sup>2</sup>,  
Zh. D. Tulekov<sup>1</sup>, A. I. Baydauletova<sup>1</sup>, Ye. E. Duysenov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup> Kazakh-Russian Medical University, Kazakhstan, Almaty

\**Corresponding author*

### Abstract

*Introduction.* Ischemic heart disease is one of the leading causes of mortality worldwide, highlighting the importance of implementing accessible and non-invasive screening tools at the population level. This study aimed to assess the feasibility of using heart rate variability parameters obtained from a wearable photoplethysmography-based device to evaluate the risk of ischemic heart disease.

*Materials and methods.* A finger-worn IoT device called «Zhurek» was developed, based on photoplethysmography technology and capable of calculating real-time heart rate variability indices. The measurements obtained from «Zhurek» were compared with data from three-lead Holter electrocardiographic

monitoring, and machine learning algorithms were applied to datasets collected from angiographically confirmed patients and healthy volunteers.

*Results.* The deviations between the new device measurements and Holter electrocardiography remained within clinically acceptable limits; heart rate variability parameters, particularly low-frequency power, and patient age were identified as key diagnostic indicators for detecting ischemic heart disease.

*Conclusion.* The «Zhurek» device is suitable for large-scale ischemic heart disease risk stratification and may facilitate a shift in healthcare from a reactive, symptom-driven approach to a proactive, prevention-oriented model.

**Keywords:** *ischemic heart disease, heart rate variability, photoplethysmography, cardiovascular diseases, machine learning.*

## АВТОРЛАР ТУРАЛЫ

**Кожамбердиева Мергул Иманбековна** – педагогика ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0429-7919>.

**Раушанова Айжан Маратовна** – «Эпидемиология, биостатистика және дәлелді медицина» кафедрасының доценті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: Aizhan.Raushanova@kaznu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4584-885X>.

**Абдрахманова Зинат** – PhD, «Гигиена және эпидемиология» кафедрасы, Қазақстан-Ресей медициналық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: Zinat.Abdrakhmanova@kaznu.edu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-1699>.

**Оракбай Ляззат** – медицина ғылымдарының докторы, доцент, «Гигиена және эпидемиология» кафедрасының меңгерушісі, Қазақстан-Ресей медициналық дуниверситеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: l.orakbai@medkrmu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0365-0979?lang=ru>.

**Тулеков Жангир Даирұлы** – PhD, «Денсаулық және қоршаған орта» зертханасының ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: d.zhangir@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5020-7179>.

**Байдаулетова Алия Иманалиевна** – медицина ғылымдарының кандидаты, сомнолог, невролог, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: baidaulet123@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

**Дүйсенов Еркін Эрманович** – заң ғылымдарының докторы, профессор, Басқарма Төрағасының орынбасары – Бірінші проректор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы; e-mail: y.y.duisenov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7043-8206>.

## ОБ АВТОРАХ

**Кожамбердиева Мергул Иманбековна** – кандидат педагогических наук, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан, Алматы; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0429-7919>.

**Раушанова Айжан Маратовна** – доцент кафедры «Эпидемиология, биостатистика и доказательная медицина», Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан, Алматы; e-mail: Aizhan.Raushanova@kaznu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4584-885X>.

**Абдрахманова Зинат** – PhD, кафедра «Гигиена и эпидемиология», Казахстанско-Российский медицинский университет, Казахстан, Алматы; e-mail: Zinat.Abdrakhmanova@kaznu.edu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-1699>.

**Оракбай Ляззат** – доктор медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой «Гигиена и эпидемиология», Казахстанско-Российский медицинский университет, Казахстан, Алматы; e-mail: l.orakbai@medkrmu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0365-0979?lang=ru>.

**Тулесов Жангир Дариұлы** – PhD, научный сотрудник лаборатории «Здоровье и окружающая среда», Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан, Алматы; e-mail: d.zhangir@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5020-7179>.

**Байдаулетова Алия Иманалиевна** – кандидат медицинских наук, сомнолог, невролог, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Казахстан, Алматы; e-mail: baidaulet123@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

**Дүйсенев Еркін Эрманович** – доктор юридических наук, профессор, заместитель председателя Правления – первый проректор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, Алматы; e-mail: y.y.duisenov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7043-8206>.

#### ABOUT AUTHORS

**Kozhamberdiyeva Mergul Imanbekovna** – Candidate of Pedagogical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0429-7919>.

**Raushanova Aizhan Maratovna** – Associate Professor, Department of Epidemiology, Biostatistics and Evidence-Based Medicine, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: Aizhan.Raushanova@kaznu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4584-885X>.

**Abdrakhmanova Zinat** – PhD, Department of Hygiene and Epidemiology, Kazakh-Russian Medical University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: Zinat.Abdrakhmanova@kaznu.edu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-1699>.

**Orakbai Lyazzat** – Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Hygiene and Epidemiology, Kazakh-Russian Medical University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: l.orakbai@medkrmu.kz; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0365-0979?lang=ru>.

**Tulekov Zhangir Dairuly** – PhD, Researcher at the “Health and Environment” Laboratory, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: d.zhangir@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5020-7179>.

**Baidauletova Aliya Imanaliyevna** – Candidate of Medical Sciences, Somnologist, Neurologist, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: baidaulet123@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5510-3590>.

**Duissenov Yerkin Ermanovich** – Doctor of Law, Professor, Deputy Chairman of the Board - First Vice-Rector, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty; e-mail: y.y.duisenov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7043-8206>.

*Авторлардың үлесі. Кожамбердиева М.И. зерттеу тұжырымдамасы мен дизайны, жобаны үйлестіру, нәтижелерді интерпретациялау және қолжазбаны дайындау; Раушанова А.М. әдіснама, протоколды әзірлеу, статистикалық талдау, қолжазбаны жазу; Абдрахманова З. клиникалық сүйемелдеу, пациенттерді іріктеу, диагнозды верификациялау, клиникалық деректерді интерпретациялау; Оракбай Л. клиникалық базаны ұйымдастыру, этикалық бақылау, профилактикалық кеңес беру; Тулесов Ж.Д. деректерді жинау және бастапқы өңдеу; Байдаулетова А.И. клинико-физиологиялық интерпретация және нәтижелерді талдау; Дүйсенев Е.Э. этика-құқықтық талдау, құқықтық кеңес беру, қолжазбаны редакциялау.*

*Мүдделер қақтығысы. Авторларда ешқандай мүдделер қақтығысы жоқ.*

*Қаржыландыру. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP26103523).*

*Барлық авторлар қолжазбаның соңғы нұсқасын оқып, мақұлдады және жұмыстың барлық аспектілері үшін жауап беруге келіседі.*

**Мақала түсті: 13.11.2025 ж.**

**Жариялауға қабылданды: 12.12.2025 ж.**