

**Ж.Е. Байғараева^{1,2}, А.К. Болтабоева^{1,2*}, Б.Т. Иманбек¹, М.И. Кожамбердиева^{1,2},
А.Б. Бектурганова^{1,2}**

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, Әл Фараби даңғылы 71

²ТОО «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Қазақстан, Алматы, Кожедуба көшесі, 3,

*e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

ИОТ ҚҰРЫЛҒЫСЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИЯ НЕГІЗІНДЕГІ ЖҮРЕК СОҒУ ЖИЛІГІ ВАРИАБЕЛЬДІГІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІМЕН ТАЛДАУ ЖӘНЕ ИШЕМИЯЛЫҚ ЖҮРЕК АУРУЫН ИНВАЗИВТІ ЕМЕС СКРИНИНГТЕУ

Аңдатпа: Жүрек-қантамыр аурулары (ЖҚА) әлемдік өлім-жітім құрылымында алдыңғы орында тұр және қоғамдық денсаулық сақтау жүйесіне айтарлықтай ауыртпалық түсіреді. Осыған байланысты ауруды ерте кезеңде анықтау, тәуекелдерді инвазивті емес тәсілдермен бағалау және профилактикалық шараларды уақытылы қолдану ерекше маңызды. Жүрек соғу жиілігінің вариабельдігі (ЖСЖВ) автономды жүйке жүйесінің теңгерімін бағалауда сенімді көрсеткіш ретінде белгілі. Алайда клиникалық тәжірибеде ЖСЖВ негізінен ұзақ мерзімді ЭКГ тіркеулері арқылы өлшенеді, бұл қымбаттылығына, инвазивтілігіне және қолжетімділігінің шектеулілігіне байланысты кең ауқымды қолдануға кедергі келтіреді.

Фотоплетизмография (ФПГ) қарапайымдылығы мен арзандығының арқасында кеңінен таралған, бірақ ЖСЖВ метрикаларының ишемиялық жүрек ауруын (ИЖА) диагностикалаудағы тиімділігі толық зерттелмеген. Осы жұмыста арнайы әзірленген арзан Zhurek құрылғысы пайдаланылды. Құрылғыдан алынған сигналдар машиналық оқыту әдістерімен өңделіп, ИЖА бар-жоғын анықтау міндеті қойылды. Алынған нәтижелер айтарлықтай болды: Zhurek құрылғысы арқылы алынған деректер негізінде жасалған модельдер 90,82% дәлдікпен ИЖА-ны болжай алды. Үш арналы Холтер-ЭКГ құрылғысымен салыстырғанда нәтижелер қанағаттанарлық келісімділік көрсетті, бұл әдістің клиникалық құндылығын арттырады.

Сонымен қатар SHAP және өзара ақпаратты талдау жиіліктік аймақ көрсеткіштерінің (HF, LF) негізгі дискриминаторлар ретіндегі маңызын растады. CTGAN арқылы теңгерімдеу оқыту тұрақтылығын күшейтіп, модельдердің орнықтылығын арттырды. Зерттеу нәтижелері ФПГ негізінде ИЖА скринингі қолжетімді, түсіндірілетін әрі экономикалық тиімді әдіс бола алатынын дәлелдейді. Болашақта көпорталықты зерттеулер жүргізу, белгілер жиынтығын кеңейту және әдісті киілетін құрылғыларға енгізу жоспарлануда.

Түйін сөздер: ишемиялық жүрек ауруы (ИЖА); жүрек-қантамыр аурулары; жүрек соғу жиілігінің вариабельдігі (ЖСЖВ, HRV); фотоплетизмография (ФПГ, PPG); Zhurek IoT құрылғысы; Холтер-ЭКГ; машиналық оқыту (Machine Learning, ML); Random Forest; SHAP; CTGAN; синтетикалық деректер; тәуекел стратификациясы; амбулаторлық мониторинг; телемедицина.

Кіріспе

Жүрек-қантамыр аурулары (ЖҚА) әлемдік өлім-жітімнің басты себебі болып қала береді. 2019 жылы олардың үлесі 17,9 млн жағдайды (32%) құрады, оның ішінде инфаркт пен инсульт – 85% [1, 2]. Қазақстанда 2022 жылы қан айналымы жүйесінің аурулары 100 000 тұрғынға шаққанда 3962,5 жағдайды, ал ИЖА – 560,7 жағдайды құрады. Бұл ЖҚА құрылымындағы ИЖА жүктемесінің жоғары екенін көрсетеді [3].

ИЖА-ның негізгі себебі – коронарлық артериялардың атеросклерозы [2]. Ұйқы сапасының бұзылыстары (қысқа ұйқы, апноэ) да ЖҚА тәуекелін арттыратыны дәлелденген. Сондықтан миокард инфарктісі мен жүрек жеткіліксіздігі сияқты асқынулардың алдын алу үшін қауіп-қатерді ерте стратификациялау қажет [4].

Жүрек соғу жиілігінің вариабельдігі (ЖСЖВ) – вегетативті жүйке жүйесінің функционалды жағдайын сипаттайтын сенімді көрсеткіш. Төмен ЖСЖВ қолайсыз кардиологиялық оқиғалармен байланысты. Дегенмен, ЖСЖВ-ны бағалау көбіне 24 сағаттық Холтер-ЭКГ арқылы жүзеге асады, бұл ауқымды қолдануға шектеу қояды [5-7].

Фотоплетизмография (ФПГ) – қолжетімді әрі пайдаланушыға ыңғайлы балама [8,9]. Алайда тұтынушылық ФПГ-сенсорларына негізделген ИЖА скринингі үшін практикалық шешім жоқ, ал ЖСЖВ-ның ең ақпаратты биомаркерлері нақтылауды қажет етеді [10-12].

Осы пилоттық зерттеуде Zhurek құрылғысы сыналды. Ол ЖСЖВ көрсеткіштерін нақты уақыт режимінде есептеп, бұлттық серверге жібереді. Үш арналы Холтер-ЭКГ-мен салыстырғанда айырмашылықтар клиникалық тұрғыда қолайлы болды: жүрек соғу жиілігі $-0,601$ соғ/мин, SDNN $+33,1$ мс, RMSSD $-4,8$ мс.

Zhurek арқылы алынған деректер Алматы қаласындағы кардиоорталық пациенттерінде талданды. Нәтижелер ЖСЖВ мен ИЖА арасындағы байланысты көрсетті, әсіресе жиіліктік аймақ метрикалары (HF, LF). CTGAN үлгіні теңгерімдеп, деректердің құрылымын сақтады [10-12]. Random Forest классификаторы ең жоғары нәтиже беріп, ИЖА-ны 94% дәлдікпен ажыратты. SHAP талдауы HF пен LF-тің басты рөлін растады.

Әдеби шолу

Жүрек-қантамыр аурулары (ЖҚА) әлемдік өлім-жітімнің басты себебі болып қалып отыр [1, 2]. Сондықтан жоғары тәуекел топтарын ерте анықтау мен тиімді профилактика маңызды [13, 14]. Қазіргі зерттеулерде физиологиялық көрсеткіштер, өмір салты факторлары және анамнезді біріктіретін көпкомпонентті модельдер қолданылады [13].

Жүрек соғу жиілігінің вариабельдігі (ЖСЖВ) – жүрек соғулар арасындағы интервалдардың өзгергіштігін сипаттайтын инвазивті емес көрсеткіш [6, 7]. Ишемиялық жүрек ауруында (ИЖА) SDNN, RMSSD, pNN50 төмендеп, LF/HF арақатынасы өзгереді, ал аритмиясы бар науқастарда ЖСЖВ сау адамдарға қарағанда төмен [6, 7, 15].

Дәстүрлі бағалау электрокардиографияға (ЭКГ) негізделген, бірақ ол қымбат әрі қолайсыз [16-18]. Соңғы жылдары фотоплетизмография (ФПГ) жеңіл қолданылуы мен қолжетімділігі арқасында кеңінен таралды. ФПГ құрылғылары смарт-сағаттар мен білезіктерге енгізіліп, үздіксіз мониторингті қолжетімді етті [8-12].

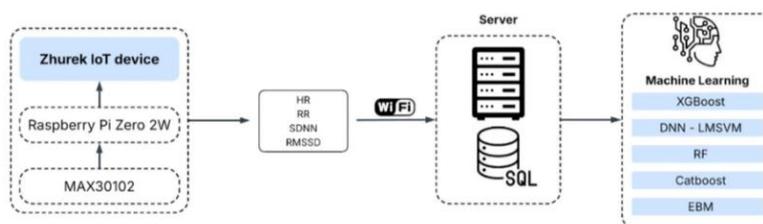
Машиналық оқыту (ML) әдістері ИЖА-ны анықтауда тиімді: нейрондық желілер мен терең оқыту 90%-дан жоғары дәлдікке жетті [19, 20, 24]. Random Forest екілік классификацияда 95,1%, көпклассты классификацияда 84,8% көрсетті. KNN мен шешім ағаштары да 90%-дан жоғары нәтижелер берді [16, 20, 21].

Тәуекел бағалауда жас пен дене салмағының индексі негізгі факторлар болып табылады. Бұрын жасалған коронарлық араласулар мен ұйқы сапасы да маңызды рөл атқарады: ұйқы тапшылығы мен апноэ ИЖА қаупін арттырады [4, 21, 22].

Коронарлық ангиография әлі де «алтын стандарт», бірақ инвазивті емес, қолжетімді әдістерге сұраныс артуда [23, 24]. MO модельдері клиникалық деректерді, бейнелеуді және ЖСЖВ метрикаларын біріктіріп, болжамды күшейте алады. Сызықтық әдістердің сезімталдығы шектеулі болса, бейсызық тәсілдер күрделі үлгілерді жақсырақ анықтайды [14]. Қысқа мерзімді нәтижелерге ғана емес, ұзақ мерзімді болжамға да назар аудару қажет [25].

Материалдар мен әдістер

Физиологиялық мониторингтің гибриді платформасы амбулаторлық жағдайда вегетативтік жүйке жүйесінің функционалдық күйін бағалауды қолдау үшін жүрек соғу жиілігі вариабельдігін (ЖСЖВ, HRV) үздіксіз талдауға арналып әзірленді. 1-суретте көрсетілгендей, ол «онборд» сигналдық өңдеуі бар киілетін датчикті және қашықтан (бұлтты) деректерді журналдауды біріктіреді.

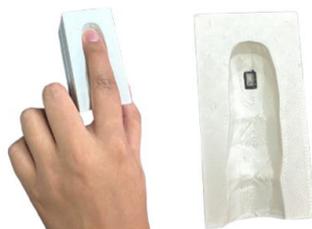


Сурет 1 – Zhurek IoT HRV–ML жүйесінің архитектурасы

1-суретте көрсетілгендей, жүйе үш қабаттан тұрады: сенсинг/перифериялық өңдеу, коммуникация және сақтау, аналитика және классификация. Zhurek IoT құрылғысы саусақтан ФПГ сигналдарын жазып, негізгі ЖСЖВ метрикаларын (ЖСЖ, RR, SDNN, RMSSD) нақты уақытта есептейді. Мәліметтер JSON форматына түрленіп, Wi-Fi/MQTT (TLS 1.3) арқылы жіберіледі және SQL дерекқорында уақыт таңбасымен сақталады. Қосымша CSV-журнал деректердің сенімділігін қамтамасыз етеді.

Аналитика қабатында ЖСЖВ белгілері машиналық оқыту модельдерімен (Random Forest, XGBoost, CatBoost, EBM, DNN-LMSVM) өңделіп, ИЖА қаупі бағаланады. Бұл автоматтандырылған бағалауды және қашықтан мониторингті жеңілдетеді.

2-суретте Zhurek – MAX30102 оптикалық сенсорын Raspberry Pi Zero 2 W микрокомпьютерімен біріктірген ықшам киілетін құрылғы. Тыныштықта қолдануға бейімделген құрылғы жүрек соққыларын 95%-дан жоғары дәлдікпен анықтап, Холтер-ЭКГ-мен салыстырғанда қанағаттанарлық сәйкестік көрсетті (Δ ЖСЖ = $-0,6$ соғ/мин, Δ SDNN = $+33$ мс, Δ RMSSD = $-4,8$ мс).



Сурет 2 – Zhurek саусаққа тағылатын ФПГ-датчигі және 3D-басылған саусақ ұстағышы

Сигналды алу және өңдеу Python тілінде жүзеге асырылады (HeartPy негізінде шыңдарды анықтау, тегістеу, артефакттарды жою). Нәтижелер MQTT арқылы жіберіліп, жергілікті сақталады. Валидация тыныштықта сигнал сапасының жоғары екенін және ЖСЖВ сенімді бағаланатынын растады, бұл құрылғыны ИЖА қаупін бақылауда қолдануға мүмкіндік береді [26-30].

Zhurek құрылғысының техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген. Берілген конфигурация физиологиялық сигналдарды сенімді тіркеуге және бұлтты серверге қауіпсіз түрде жіберуге мүмкіндік береді.

Кесте 1 – Zhurek IoT құрылғысының негізгі техникалық сипаттамалары

Параметр	Мені / Диапазоны	Ескертпе
Оптикалық сенсор үлгісі	MAX30102	Қызыл/ИК LED, интегралды фотодетектор
Өлшенетін сигнал түрі	Фотоплетизмография (ФПГ, PPG)	Саусақ ұшынан
Жүрек соғу жиілігі диапазоны	40–200 соғ/мин	Адам ағзасына арналған диапазон
Үлгілеу жиілігі (sampling rate)	25–100 Гц	Пайдаланушы параметріне тәуелді
Микрокомпьютер / MCU	Raspberry Pi Zero 2 W	4 ядролы ARM Cortex-A53
Интерфейс (сенсор–MCU)	I ² C	MAX30102 → Raspberry Pi
Сымсыз байланыс	Wi-Fi 2.4 GHz (802.11n)	MQTT протоколы
Мәлімет форматы	JSON	Серверге жіберілетін құрылымдалған пакет
Қуат көзі	5 В (USB)	1 А тұтыну тоғы
Қорғаныс корпусы	3D-басылған полимер	Саусақ ұстағыш модулі бар

ЖСЖВ-ның көптеген индекстерінің прогностикалық мәні жақсы құжатталған. Эталон ретінде ЭКГ-ны пайдалана отырып, алдыңғы зерттеулер SDNN, RMSSD және ЖСЖВ-ның үшбұрышты индексі клиникалық нәтижелермен тығыз байланысты екенін көрсетті [6, 7]. Негізгі міндет – осы диагностикалық қабілетті клиникалық ЭКГ-жүйелерден практикалық инвазивті емес киілетін құрылғыларға көшіру.

Zhurek-тің ЖСЖВ талдауына жарамдылығын бағалау үшін клиникалық үш арналы Холтер-монитормен салыстырмалы валидация жүргізілді. Құрылғылар жоғары келісімділік көрсетті: Zhurek сигналдарының траекториялары Холтер-ЭКГ қисықтарын жақын қайталады (3-сурет).

Zhurek пен ЭКГ уақыттық қатарлары жақсы үйлесім көрсетті: ырғақ динамикасы сәйкес, айырмашылықтар тек абсолюттік деңгейлерде байқалды, бұл ФПГ мен ЭКГ табиғи ерекшеліктерімен түсіндіріледі. ЖСЖВ талдауы вариабельдікке негізделгендіктен, трендтердің жақындығы құрылғының сенімділігін дәлелдейді [29, 30].



Сурет 3 – ЖСЖ динамикасы: Zhurek құрылғысы мен Холтер-монитор салыстыруы

МО модельдерін үйрету үшін екі когорта пайдаланылды: клиникалық тұрғыда расталған ИЖА пациенттері және сау бақылау тобы. Барлық қатысушылардың деректері Zhurek пен клиникалық эталон VTL-08 Холтер-ЭКГ құрылғысымен параллель түсірілді. VTL-08 жоғары жиілікті және ұзақ мониторингке қабілетті CE-сертификатталған жүйе, сондықтан ЖСЖВ зерттеулерінде кеңінен қолданылады.

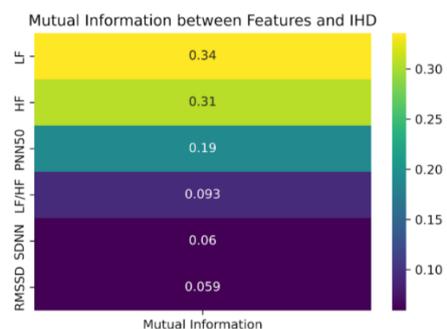
Пациенттік топ аурудың әртүрлі сатыларын қамтыды, бұл модельдердің жалпылануын арттырды. Сау еріктілерде шатастырушы факторларды азайту үшін бақылау шарттары сақталды (кофеин, алкоголь, темекіден бас тарту, қалыпты ұйқы). Артефактілері көп немесе дайындық нұсқауларын сақтамаған жазбалар алынып тасталды.

Барлық сигналдар RR-интервалдары түрінде сақталып, HR, SDNN, RMSSD сияқты негізгі метрикалар автоматты есептелді. Қорытынды кестеге SDNN, RMSSD, pNN50, LF, HF және LF/HF енгізілді.

Деректер теңгерімсіздігін жою үшін Conditional Tabular GAN (CTGAN) қолданылып, сау жазбалар саны 20-дан 200-ге дейін ұлғайтылды. Финалдық жиынтық 500 бақылаудан тұрды. CTGAN аралас айнымалыларды синтездеуде тиімді, сирек категорияларды толықтырып, үлгілердің шынайылығы мен әртүрлілігін арттырды [31, 32].

Нәтижелер

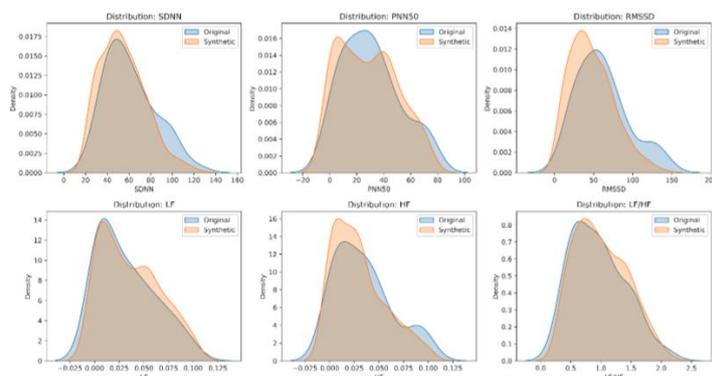
4-суретте көрсетілгендей, ЖСЖВ белгілері мен ИЖА арасындағы тәуелділік өзара ақпарат әдісімен бағаланды. Жиіліктік аймақ метрикалары жетекші орын алды: LF = 0,34 және HF = 0,31 ең жоғары мәндерге жетіп, ИЖА статусымен ең күшті байланысын көрсетті. pNN50 орташа деңгейде болды (MI = 0,19). Уақыттық аймақ метрикалары айтарлықтай төмен нәтиже берді: SDNN = 0,06, RMSSD = 0,059, LF/HF қатынасы = 0,093. Бұл LF пен HF-тің негізгі индикаторлар екенін айқындайды.



Сурет 4 – ЖСЖВ белгілерінің ИЖА-мен өзара ақпараты

Сау бақылау деректерінің аздығын өтеу үшін CTGAN негізінде қосымша ЖСЖВ жазбалары генерацияланды. «Сау» ішкіжиын 50-ден 250 бақылауға дейін кеңейтіліп, модель 2000 эпох бойы үйретілді. Синтетикалық үлгілер тек модельдерді үйретуге қолданылды, ал тестілеу тек нақты деректерде жүргізілді [31, 32].

5-суреттен көрінгендей, синтетикалық үлестірімдер бастапқы деректерге жақсы сәйкесіп, негізгі құрылым мен өлшем диапазоны сақталды. SDNN, RMSSD және LF бойынша нақты және синтетикалық деректер арасында жоғары үйлесімділік байқалды; pNN50 және LF/HF үшін аздаған айырмашылықтар болды. Мұндай өзгешеліктер деректер құпиялығын қорғауға да ықпал етеді.



Сурет 5 – ЖСЖВ негізгі метрикаларының үлестірімдері – SDNN, RMSSD, pNN50, LF, HF, LF/HF – бастапқы және синтетикалық деректер жиынтықтарында

Жалпы, синтетикалық жиынтық негізгі статистикалық қасиеттер мен белгілер арасындағы тәуелділіктерді сақтап, клиникалық тұрғыдан мағыналы интерпретация мен орнықты модельдер құруға мүмкіндік берді.

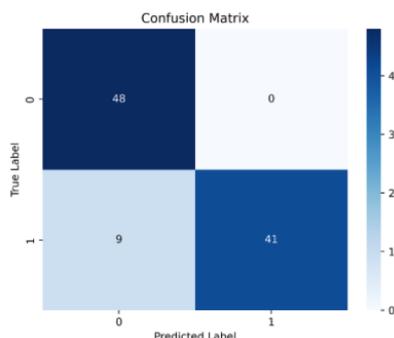
Кластар теңгерімсіздігін азайту үшін CTGAN үлгілері бастапқы деректермен біріктірілді. ЖСЖВ белгілері бойынша ИЖА статусын болжау үшін бес модель қолданылды: Random Forest, CatBoost, XGBoost, DNN-LMSVM және EBM. Бағалау 5-қатпарлы кросс-валидациямен жүргізіліп, accuracy, F1-score, precision және recall есептелді (2-кесте).

Кесте 2 – Сапа метрикалары — accuracy, precision, recall және F1-score – ЖСЖВ белгілері бойынша ИЖА-ны болжауға арналған МО модельдері үшін

Бағалау көрсеткіштері	RF	CatBoost	XGboost	DNN-LMSVM	EBM
Accuracy	90.82%	88.78%	88.78%	84.69%	88.78%
Precision	92.11%	90.01%	90.68%	86.00%	88.78%
Recall	91.00%	88.95%	89.00%	84.31%	88.78%
F1-Score	90.11%	87.91%	87.64%	85.15%	87.91%

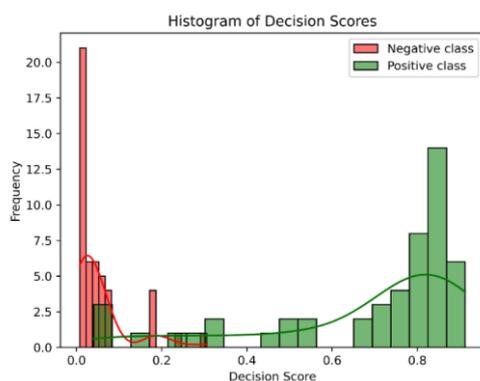
Барлық модельдер ИЖА мен бей-ИЖА-ны сенімді ажыратты. Ең жоғары нәтиже Random Forest көрсетті (accuracy = 90,82%, precision = 92,11%, recall = 91,00%, F1-score = 90,11%). CatBoost, XGBoost және EBM – 88,78%, ал DNN-LMSVM – 84,69%.

6-суретте бинарлық классификацияға арналған қате матрицасы көрсетілген. 0 класының барлық 48 бақылауы дұрыс анықталып, жалған-позитивтер тіркелмеді. 1 класы үшін 50 жағдайдың 41-і дұрыс анықталды, ал 9-ы қате түрде 0 класына жіктелді. Бұл 41 шынайы позитив пен 9 жалған-негативке сәйкес келеді.



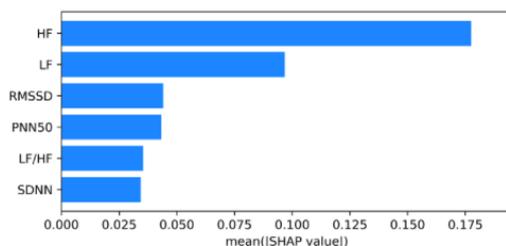
Сурет 6 – ЖСЖВ метрикалары бойынша ИЖА-ны бинарлық болжауға арналған қате матрицасы

7-суретте шешуші скорингтердің гистограммасы берілген. Негативті класс 0 маңында, ал позитивті класс негізінен 0,7-0,9 аралығында шоғырланған. Үлестірімдердің айқын бөлінуі модельдің жоғары дискриминациясын және сенімді болжамдарын көрсетеді.



Сурет 7 – ИЖА-ны болжау міндетінде класстар бойынша (негативті vs позитивті) шешуші скорингтердің гистограммасы

ИЖА-ны болжауда әр ЖСЖВ белгісінің үлесін сандық тұрғыда бағалау үшін SHAP әдісі қолданылды. 8-суреттегі қорытынды әр белгіні орташа абсолюттік SHAP мәніне сәйкес, яғни орташа үлесіне қарай рейтингтейді. Көшбасшы белгі – HF, одан кейін LF. Әрі қарай ықпалы бойынша рNN50, SDNN және RMSSD орналасқан, ал LF/HF қатынасы модель шешімдеріне ең аз әсер етті.



Сурет 8 – ИЖА-ны болжауға арналған ЖСЖВ белгілерінің SHAP негізіндегі маңыздылық бағасы

Талқылаулар

Zhurek құрылғысы клиникалық холтерлік ЭКГ-мен салыстырылып, уақыттық паттерндердің жоғары сәйкестігін көрсетті. Бұл ЖСЖВ талдауына қажетті жүрек соғысы динамикасын сенімді тіркейтінін және ФПГ негізінде қолжетімді скрининг құралы бола алатынын дәлелдейді [16-18].

Өзара ақпарат талдауы LF пен HF-тің ИЖА-мен ең тығыз байланысты екенін көрсетті [33]. Сау қатысушылардың аздығына байланысты теңгерімсіздікті азайту үшін CTGAN қолданылып, синтетикалық деректер статистикалық құрылымды сақтап, модельдердің орнықтылығын арттырды [26, 27].

SHAP-талдау жиілік аймақ айнымалыларының (HF, LF) басты рөлін растады. Бұл парасимпатикалық тонустың әлсіреуі ЖҚА қаупін арттыратыны туралы деректермен үйлеседі. HF вагустық модуляцияның ИЖА-мен байланысын ерекше айқындады [34-36].

Зерттеудің шектеулері: үлгінің шағын көлемі, әсіресе сау топта, және әдістердің айырмашылығы. ЭКГ электрлік белсенділікті тікелей өлшеп, жоғары нақтылық береді, бірақ электродтардың тұрақсыздығына сезімтал; ФПГ қан ағымын бейнелейді, бірақ перфузия әлсіз немесе датчик дұрыс орналаспағанда сигнал сапасы төмендеуі мүмкін. Соған қарамастан, жетілдірілген өңдеу әдістерімен ФПГ ЭКГ-ға жақындай алады және бұл зерттеуде ИЖА классификациясында жоғары дәлдікке (AUC = 0,95) қол жеткізді [29, 30, 37].

Қорытынды

Бұл зерттеу арзан фотоплетизмографияны (ФПГ) машиналық оқыту және интерпретация әдістерімен біріктіру ИЖА скринингі үшін клиникалық құнды ЖСЖВ аналитикасын қамтамасыз ете алатынын көрсетті. Zhurek құрылғысы 5-қатпарлы кросс-валидацияда 90,82% дәлдікке жетті. Холтер-ЭКГ-мен салыстырғанда негізгі уақыттық индекстердің айырмашылықтары клиникалық тұрғыдан қолайлы болды. SHAP және MI талдауы LF пен HF-ті басты классификациялық факторлар ретінде бөліп көрсетті. CTGAN сынып теңгерімін жақсартып, модельдердің орнықтылығын арттырды.

Шектеулер: зерттеу тыныштық жағдайымен шектелді, демографиялық әртүрлілік аз қамтылды, ал деректерді аугментациялау ықтимал ығысу қаупін тудырады. Сондықтан көпорталықты, әртүрлі популяциялардағы валидация қажет.

Болашақ бағыттар: нақты өмірлік жағдайларда проспективті зерттеулер, қозғалыс датчиктерімен артефакттарды азайту, ЭКГ және тәуекел шкалаларымен салыстыру, ұзақ мониторингте қайта калибрлеу. Әрі қарай мультисенсорлық интеграция, құпиялылықты сақтайтын оқыту, әділдік аудиті және реттеуші мақұлдауға дәлелдік база қалыптастыру маңызды.

Әдебиеттер тізімі

1. World Health Organization. Cardiovascular Diseases (CVDs). Available online: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accessed on 11 June 2024).
2. Global Epidemiology of Ischemic Heart Disease: Results from the Global Burden of Disease Study / M.A. Khan et al // *Cureus*. – 2020. – № 12. – P. e9349. <https://doi.org/10.7759/cureus.9349>.
3. Tengrinews.kz. The Most Common Disease among Kazakhstanis Has Been Named. Available online: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/nazvana-samaya-rasprostrannaya-bolezn-sredi-kazahstantsev-503527/ (accessed on 18 October 2022).
4. Smoking, Drinking, Diet and Physical Activity – Modifiable Lifestyle Risk Factors and Their Associations with Age to First Chronic Disease / R. Ng et al // *Int. J. Epidemiol.* – 2020. – № 49. – P. 113-130. <https://doi.org/10.1093/ije/dyz078>.
5. Enhancing Comprehensive Assessments in Chronic Heart Failure Caused by Ischemic Heart Disease: The Diagnostic Utility of Holter ECG Parameters / Ş.-T. Duca et al // *Medicina*. – 2024. – № 60. – P. 1315. <https://doi.org/10.3390/medicina60081315>.
6. Heart Rate Variability and Myocardial Infarction: Systematic Literature Review and Metanalysis / F. Buccelletti et al // *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* – 2009. – № 13. – P. 299-307.
7. Short-Term vs. Long-Term Heart Rate Variability in Ischemic Cardiomyopathy Risk Stratification / A. Voss et al // *Front. Physiol.* – 2013. – № 4. – P. 364. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00364>.
8. Advances in Photoplethysmography Signal Analysis for Biomedical Applications / J.L. Moraes et al // *Sensors*. – 2018. – № 18. – P. 1894. <https://doi.org/10.3390/s18061894>.
9. The Use of Photoplethysmography for Assessing Hypertension / M. Elgendi et al // *npj Digit. Med.* – 2019. – № 2. – P. 60. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0136-7>.
10. Diagnostic Features and Potential Applications of PPG Signal in Healthcare: A Systematic Review / M.A. Almarshad et al // *Healthcare*. – 2022. – № 10. – P. 547. <https://doi.org/10.3390/healthcare10030547>.
11. Kim K.B. Photoplethysmography in Wearable Devices: A Comprehensive Review of Technological Advances, Current Challenges, and Future Directions / K.B. Kim, H.J. Baek // *Electronics*. – 2023. – № 12. – P. 2923. <https://doi.org/10.3390/electronics12132923>.
12. Survey: Smartphone-Based Assessment of Cardiovascular Diseases Using ECG and PPG Analysis / M. Shabaan et al // *BMC Med. Inform. Decis. Mak.* – 2020. – № 20. – P. 177. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01199-7>.
13. Cardiovascular Disease Risk Prediction Using Automated Machine Learning: A Prospective Study of 423,604 UK Biobank Participants / A.M. Alaa et al // *M. PLoS ONE*. – 2019. – № 14. – P. e0213653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213653>.
14. Exploring Relationships of Heart Rate Variability, Neurological Function, and Clinical Factors with Mortality and Behavioral Functional Outcome in Patients with Ischemic Stroke / M.-J. Wu et al // *Diagnostics*. – 2024. – № 14. – P. 1304. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14121304>.
15. Heart Rate Variability in Acute Myocardial Infarction: Results of the HeaRt-V-AMI Single-Center Cohort Study / C. Brinza et al // *J. Cardiovasc. Dev. Dis.* – 2024. – № 11. – P. 254. <https://doi.org/10.3390/jcdd11080254>.
16. A Novel Wearable Device for Continuous Ambulatory ECG Recording: Proof of Concept and Assessment of Signal Quality / C. Steinberg et al // *Biosensors*. – 2019. – № 9. – P. 17. <https://doi.org/10.3390/bios9010017>.
17. Holter ECG for Syncope Evaluation in the Internal Medicine Department—Choosing the Right Patients / O. Freund et al // *J. Clin. Med.* – 2022. – № 11. – P. 4781. <https://doi.org/10.3390/jcm11164781>.

18. Self-Reporting Technique-Based Clinical-Trial Service Platform for Real-Time Arrhythmia Detection / H. Kim et al // *Appl. Sci.* – 2022. – № 12. – P. 4558. <https://doi.org/10.3390/app12094558>.
19. Heart Disease Diagnosis and Prediction Using Machine Learning and Data Mining Techniques: A Review / A. Hazra et al // *Adv. Comput. Sci. Technol.* – 2017. – № 10. – P. 2137-2159.
20. Automated Detection of Coronary Artery Disease, Myocardial Infarction and Congestive Heart Failure Using GaborCNN Model with ECG Signals / V. Jahmunah et al // *Comput. Biol. Med.* – 2021. – № 134. – P. 104457. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104457>.
21. Trigka M. Long-Term Coronary Artery Disease Risk Prediction with Machine Learning Models / M. Trigka, E. Dritsas // *Sensors.* – 2023. – № 23. – P. 1193. <https://doi.org/10.3390/s23031193>.
22. Roerecke M. Alcohol Consumption, Drinking Patterns, and Ischemic Heart Disease: A Narrative Review of Meta-Analyses and a Systematic Review and Meta-Analysis of the Impact of Heavy Drinking Occasions on Risk for Moderate Drinkers / M. Roerecke, J. Rehm // *BMC Med.* – 2014. – № 12. – P. 182. <https://doi.org/10.1186/s12916-014-0182-6>.
23. Comparative Analysis of the Diagnostic Effectiveness of SATRO ECG in the Diagnosis of Ischemia Diagnosed in Myocardial Perfusion Scintigraphy Performed Using the SPECT Method / Ł.J. Janicki et al // *Diagnostics.* – 2022. – № 12. – P. 297. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020297>.
24. Prognostic Role of Electrocardiographic Alternans in Ischemic Heart Disease / I. Marcantoni et al // *J. Clin. Med.* – 2025. – № 14. – P. 2620. <https://doi.org/10.3390/jcm14082620>.
25. Exploring Relationships of Heart Rate Variability, Neurological Function, and Clinical Factors with Mortality and Behavioral Functional Outcome in Patients with Ischemic Stroke / M.-J. Wu et al // *Diagnostics.* – 2024. – № 14. – P. 1304. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14121304>.
26. The Influence of Physiological Noise Correction on Test–Retest Reliability of Resting-State Functional Connectivity / R.M. Birn et al // *Brain Connect.* – 2014. – № 4. – P. 511-522. <https://doi.org/10.1089/brain.2014.0284>.
27. Reliability of Resting Metabolic Rate Measurements in Young Adults: Impact of Methods for Data Analysis / Y. Sanchez-Delgado et al // *Clin. Nutr.* – 2018. – № 37. – P. 1618-1624. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.07.026>.
28. McDuff D. Remote Measurement of Cognitive Stress via Heart Rate Variability / D. McDuff, S. Gontarek, R. Picard // In Proceedings of the 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, IL, USA. – 2014. – № 26-30. – P. 2957-2960. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944243>.
29. Validity of Ultra-Short-Term HRV Analysis Using PPG – A Preliminary Study / A. Taoum et al // *Sensors.* – 2022. – № 22. – P. 7995. <https://doi.org/10.3390/s22207995>.
30. Accuracy of Heart Rate Variability Estimated with Reflective Wrist-PPG in Elderly Vascular Patients / C. Hoog Antink et al // *Sci. Rep.* – 2021. – № 11. – P. 8123. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87489-0>.
31. Eom G. Searching for Optimal Oversampling to Process Imbalanced Data: Generative Adversarial Networks and Synthetic Minority Over-Sampling Technique / G. Eom, H. Byeon // *Mathematics.* – 2023. – № 11. – P. 3605. <https://doi.org/10.3390/math11163605>.
32. Adiputra I.N.M. CTGAN-ENN: A Tabular GAN-Based Hybrid Sampling Method for Imbalanced and Overlapped Data in Customer Churn Prediction / I.N.M. Adiputra, P. Wanchai // *J. Big Data.* – 2024. – № 11. – P. 121. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00982-x>.
33. Relationship Between Heart Rate Variability Traits and Stroke: A Mendelian Randomization Study / W. Liu et al // *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* – 2025. – № 34. – P. 108251. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2025.108251>.
34. The Hemisphere of the Brain in Which a Stroke Has Occurred Visible in the Heart Rate Variability / J. Aftyka et al // *J. Life.* – 2022. – № 12. – P. 1659. <https://doi.org/10.3390/life12101659>.
35. Ischemic Stroke Risk Assessment by Multiscale Entropy Analysis of Heart Rate Variability in Patients with Persistent Atrial Fibrillation / G. Chairina et al // *Entropy.* – 2021, 23, 918. <https://doi.org/10.3390/e23070918>.
36. Baroreflex Sensitivity but Not Microvolt T-Wave Alternans Can Predict Major Adverse Cardiac Events in Ischemic Heart Failure / D.K. Kaufmann et al // *Cardiol. J.* – 2022. – № 29. – P. 1004-1012. <https://doi.org/10.5603/CJ.a2020.0129>.
37. Accuracy of Physicians Interpreting Photoplethysmography and Electrocardiography Tracings to Detect Atrial Fibrillation: INTERPRET-AF / H. Gruwez et al // *Front. Cardiovasc. Med.* – 2021. – № 8. – P. 734737. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.734737>.

Ж.Е. Байгараева^{1,2}, А.К. Болтабоева^{1,2*}, Б.Т. Иманбек¹, М.И. Кожамбердиева^{1,2},
Д.Н. Тұрмаханбет^{1,2}, А.Б. Бектурганова^{1,2}

¹Казахский национальный университет имени Аль-Фараби,
050040, Казахстан, Алматы, проспект Аль-Фараби 71

²ТОО «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Казахстан, Алматы, улица Кожедуба 3
*e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА НА ОСНОВЕ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО СКРИНИНГА ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА ZHUREK IOT

Сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смертности в мире, поэтому на ранних этапах неинвазивная оценка риска имеет важное значение как для профилактики, так и для эффективного распределения ресурсов здравоохранения. Вариабельность сердечного ритма (BCP) является надежным показателем вегетативного баланса, однако в клинической практике до сих пор преимущественно используются длительные ЭКГ-записи, что ограничивает широкое применение. Несмотря на широкое распространение фотоплетизмографии (ФПГ), эффективность метрик BCP, полученных из ФПГ, для выявления ишемической болезни сердца (ИБС) до конца не определена.

В данном исследовании ФПГ-сигналы, полученные с помощью недорогого устройства Zhurek, в сочетании с классификаторами машинного обучения позволили выявлять ИБС с точностью 90,82%. В сравнении с трехканальной холтеровской ЭКГ наблюдалось удовлетворительное согласие. Анализ SHAP и взаимной информации показал ключевую роль частотных показателей (HF, LF). Метод балансировки CTGAN повысил устойчивость обучения.

Полученные результаты подтверждают, что использование ФПГ может стать доступным и интерпретируемым способом скрининга ИБС. Следующие шаги – многоцентровые исследования, расширение набора признаков и внедрение методики в носимые устройства.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца (ИБС); сердечно-сосудистые заболевания; вариабельность сердечного ритма (BCP, HRV); фотоплетизмография (ФПГ, PPG); устройство Zhurek IoT; Холтер-ЭКГ; машинное обучение (Machine Learning, ML); Random Forest; SHAP; CTGAN; синтетические данные; стратификация риска; амбулаторный мониторинг; телемедицина.

Zh.Y. Baigarayeva^{1,2}, A.K. Boltaboyeva^{1,2*}, B.T. Imanbek¹, M.I. Kozhamberdiyeva^{1,2},
D.N. Turmakhanbet^{1,2}, A.B. Bekturganova^{1,2}

¹Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue 71

²LLP «Kazakhstan R&D Solutions»,
050056, Kazakhstan, Almaty, Kozheduba str., 3
*e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz

PHOTOPLETHYSMOGRAPHY-BASED HEART RATE VARIABILITY ANALYSIS USING MACHINE LEARNING METHODS FOR NON-INVASIVE SCREENING OF CORONARY ARTERY DISEASE WITH THE ZHUREK IOT DEVICE

Cardiovascular diseases remain the leading cause of mortality worldwide; therefore, early-stage noninvasive risk assessment is crucial both for prevention and for the efficient allocation of healthcare resources. Heart rate variability (HRV) is a reliable indicator of autonomic balance, yet in clinical practice it still relies mainly on long-term ECG recordings, which limits large-scale application. Although photoplethysmography (PPG) is widely available, the effectiveness of PPG-derived HRV metrics for detecting ischemic heart disease (IHD) has not been fully established.

In this study, PPG signals obtained from a low-cost Zhurek device, combined with machine learning classifiers, enabled IHD detection with an accuracy of 90.82%. Comparison with three-channel Holter ECG showed satisfactory agreement. SHAP and mutual information analyses highlighted the dominant role of frequency-domain features (HF, LF). Data balancing using CTGAN improved training stability.

Overall, the results demonstrate that PPG-based HRV analysis offers a feasible, accessible, and interpretable approach for IHD screening. Future steps include multicenter validation, expansion of feature sets, and integration of the method into wearable devices.

Key words: coronary artery disease (CAD); cardiovascular diseases; heart rate variability (HRV); photoplethysmography (PPG); Zhurek IoT device; Holter ECG; machine learning (ML); Random Forest; SHAP; CTGAN; synthetic data; risk stratification; ambulatory monitoring; telemedicine.

Авторлар туралы ақпарат

Жанель Ермашқызы Байғараева – магистр, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Асия Кубланди кызи Болтабоева* – магистр, PhD 3 курс студенті, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>.

Бағлан Талғатқызы Иманбек – PhD, доцент, профессор-зерттеуші, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Мергул Иманбековна Кожамбердиева – педагогика ғылымдарының кандидаты, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com.

Айман Болатовна Бектурганова – бакалавр 4 курс студенті, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: aiman0908b@gmail.com.

Информация об авторах

Жанель Ермашқызы Байғараева – магистр, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Асия Кубланди кызи Болтабоева* – магистр, PhD студентка 3 курса, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>.

Бағлан Талғатқызы Иманбек – PhD, доцент, профессор-исследователь, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Мергул Иманбековна Кожамбердиева – кандидат педагогических наук, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com.

Айман Болатовна Бектурганова – бакалавр студентка 4 курса, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: aiman0908b@gmail.com.

Information about the authors

Zhanel Yermashkyzy Baigarayeva – Master's degree holder, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-3570>.

Assiya Kublandi kyzi Boltaboyeva* – Master's degree holder, 3rd-year PhD student, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: boltaboyeva_assiya3@live.kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-9910>.

Baglan Talgatkyzy Imanbek – PhD, Associate Professor, Research Professor, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: baglan.imanbek@kaznu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7249-380X>.

Mergul Imanbekovna Kozhamberdiyeva – Candidate of Pedagogical Sciences, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: kozhamberdiyeva.m@outlook.com.

Aiman Bolatovna Bekturganova – 4th year Bachelor's student, Al Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: aiman0908b@gmail.com.

Редакцияға енуі 18.09.2025

Өңдеуден кейін түсуі 17.11.2025

Жариялауға қабылданды 18.11.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-28](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-28)

MPHTI: 50.41.23; 81.93.29



Б.А. Шырын^{1*}, Т.А. Аhanger², А.К. Жумадилаева¹, Г.Б. Бекешова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
010000 Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

²Университет принца Sattam Bin Abdulaziz,
Королевство Саудовская Аравия, г. Эль-Хардж,

*e-mail: bexultan.shyryn@gmail.com

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ЭВОЛЮЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИТИК БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СЕТЯХ (SDN) С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ТСАМ И ЗАДЕРЖКИ

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению задачи оптимизации политик безопасности в программно-определяемых сетях (SDN). Решение этой проблемы авторы предлагают осуществлять с помощью NSGA-II – эффективного алгоритма эволюционной