**Иманкулова Бинара Бакытжановнаға**
**“Ақылды қала ауасының сапасы туралы деректерді басқаруға арналған шығу тегін ескеретін LoRaWAN IoT құрылымын жобалау және енгізу” атты диссертациялық жұмысына, 8D06102 – «Компьютерлік және бағдарламалық инженерия» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған**

# АҢДАТПА


**Жұмыстың жалпы сипаттамасы.**

Диссертацияда деректердің шығу тегін (provenance) қолдайтын LoRaWAN негізіндегі Заттар интернеті (IoT) фреймворкін жобалау және іске асыру ұсынылған. Қолданудың мақсатты саласы ретінде ақылды қалалардағы ауа сапасы туралы деректерді басқару таңдалды. Фреймворк мониторинг деректеріне деген сенімді үш негізгі бағыт бойынша қамтамасыз етеді: шығу тегі, тұтастық және толықтық. Мұнда шығу тегі әрбір сақталған өлшемнің қалай қабылданғанын, декодталғанын, тексерілгенін және сақталғанын сипаттайды. Тұтастық ол жазылған тарихқа кейін енгізілген өзгерістерді анықтау мүмкіндігі, ал толықтық барлық күтілген өлшемдердің алынғанын немесе, алынбаса, олардың қаншасы жетіспейтінін көрсетеді.

Фреймворк деректердің шығу тегін платформа жағында, жоғары бағыттағы хабарлама (uplink) қабылданғаннан кейін тіркейді. Ол LoRaWAN хаттамасына ешқандай өзгеріс енгізуді талап етпейді және сенсорлық түйіннің пайдалы жүктемесіне шығу тегі туралы деректерді қоспайды. Шығу тегі жазбалары W3C PROV семантикасына сәйкес келеді және әр құрылғы үшін жеке хеш-байланысты тізбектерде тізбек басының бақылау нүктелерімен бірге сақталады. Осылайша, белгіленген қауіп моделі аясында архитектура сақталған тарихтағы рұқсатсыз өзгерістерді анықтауды қамтамасыз етеді. Дәл осы жазбалар кері және тура бақылауға арналған PROV үлгісіндегі графтық көріністерді құру үшін пайдаланылады. Әрбір жетіспейтін өлшем үшін фреймворк деректердің жоғалған кезеңін анықтайды: құрылғы, платформаға дейінгі байланыс, платформада қабылдау немесе өңдеу. Әрбір деректер жоғалуының себебі кадр есептегіштері, қабылдау уақыты, жазбалардың күйі және желілік сервердің оқиғалар журналы арқылы анықталады. Қолда бар деректер жеткіліксіз болған жағдайда, себеп анықталмаған ретінде жіктеледі.

**Жұмыстың өзектілігі.**

Заттар интернеті (IoT) технологиялары қазіргі қалалық инфрақұрылымның маңызды бөлігіне айналды. Ақылды қала қызметтері сенсорлық түйіндер жасайтын және шлюздер, байланыс желілері мен платформа деңгейіндегі өңдеу жүйелері арқылы берілетін өлшемдерге сүйенеді. Қазіргі болжамдарға сәйкес, 2030 жылға қарай әлемдегі қосылған құрылғылар саны 32,1 миллиардқа жетеді. Мұндай өсім қоршаған ортаны бақылауда, жол қозғалысын басқаруда, қоғамдық қауіпсіздікте және басқа да қалалық қолданбаларда пайдаланылатын деректердің көлемін де, әртектілігін де арттырады.

Сенсорлық өлшемдер мониторингке, есептілікке, жедел басқаруға және шешім қабылдауға қызмет етеді. Жұмыс деректер жиынтығының бөлігіне айналмас бұрын, өлшемдер тіркеу, сымсыз беру, платформаға қабылдау, өңдеу, сақтау және жариялау кезеңдерінен өтеді. Әр кезеңде метадеректер қосылуы, деректер пішімі өзгеруі немесе жаңа жазба жасалуы мүмкін. Сонымен қатар өлшемдер платформа жағында өңделу кезінде жоғалуы, қайталануы, қайта жіберілуі, қате декодталуы немесе өзгертілуі мүмкін.

Мұндай мәселелер міндетті түрде зиянды әрекеттерден туындамайды. Пакеттердің жоғалуы, бір хабарламаны бірнеше шлюздің қайталап қабылдауы, декодтау қателері және сақтау кезіндегі ақаулар да соңғы деректер жиынтығына әсер етеді. Ауа сапасын бақылау мұндай жағдайларға ерекше сезімтал, себебі жетіспейтін немесе қате өңделген мәндер ұзақ мерзімді статистикаға және экологиялық көрсеткіштерге әсер етуі мүмкін. Өңдеу тарихы жазылмаса, сақталған мәннің қалай қабылданғанын, түрлендірілгенін және деректер базасына жазылғанын анықтау қиынға соғады.

Бұл тарихты деректердің шығу тегі тіркейді. Ол өлшемнің көзін, қабылдау жағдайларын, өңдеу операцияларын және нәтижесінде сақталған жазбаны сипаттайды. Сондықтан шығу тегі туралы ақпарат бақыланушылықты, аудит жүргізу мүмкіндігін және тұтастықты тексеруді қамтамасыз ете алады. Бұл функциялар экологиялық деректер қоғамдық есептілік, ғылыми талдау және ұзақ мерзімді қала жоспарлау үшін пайдаланылған кезде маңызды.

Деректердің шығу тегіне қатысты қолданыстағы тәсілдер қорғау мен ұсынудың әртүрлі нысандарын қамтамасыз етеді. Блокчейн негізіндегі жүйелер жалғандықтан қорғалған жазбаларды сақтай алады, бірақ көбінесе сақтауға, кідіріске және консенсусқа қосымша шығындар әкеледі. Криптографиялық механизмдер жазбалардың өзгеруін анықтай алады, алайда қосымша есептеулерді, кілттерді басқару рәсімдерін немесе хаттаманы өзгертуді талап етуі мүмкін. Мұндай талаптарды аз қуатты сенсорлық түйіндерде және LPWAN желілерінде орындау қиын.

LoRaWAN қоршаған ортаны таратылған бақылау үшін кеңінен қолданылады, себебі ол аз энергия тұтына отырып, алыс қашықтыққа байланысты қамтамасыз етеді. Хаттама сонымен қатар беру кезінде пайдалы жүктеменің құпиялылығын және хабарламалардың тұтастығын тексеруді қамтамасыз етеді. Алайда ол жоғары бағыттағы хабарлама қабылданғаннан кейін өлшемнің өңделу тарихын сақтамайды. Сондықтан сақталған және экспортталған жазбалар шығу тегі туралы тиісті жазбасыз өзгертілуі мүмкін. Соңғы зерттеулер LoRaWAN-мен үйлесімді шығу тегін тіркеуді, жалғандықты анықтайтын сақтауды және бақыланушылықты біріктіретін практикалық тәсілдердің әлі де аз екенін көрсетеді.

Қолданыстағы тәсілдер сирек шешетін тағы бір мәселе ол деректердің жетіспеуі. Ұзақ мерзімді LoRaWAN желілерінде күтілген өлшемдердің едәуір бөлігі ешқашан сақталмайды: құрылғылар деректерді беруді тоқтатады, кадрлар радиожолда жоғалады, хабарламалар желілік сервер мен платформа арасында жоғалады немесе декодтаудан өтпейді. Толықтық әдетте бір

пайызбен көрсетіледі, ол қанша деректің жетіспейтінін көрсетеді, бірақ олардың қай жерде жоғалғанын көрсетпейді. Мұндай ақпаратсыз операторлар құрылғыларды жөндеу, шлюздердің қамту аймағын кеңейту немесе платформаны түзету қажеттігін шеше алмайды, ал талдаушылар деректердегі олқылықтардың кездейсоқ немесе жүйелі екенін бағалай алмайды.

1-тараудағы жүйелі әдебиеттік шолу IoT және ақылды қала жүйелеріне арналған деректердің шығу тегі бойынша қолданыстағы шешімдердегі төрт олқылықты анықтады: соңғы құрылғыларды өзгертуді талап ететін немесе өңдеу конвейерінің тек бір бөлігін қамтитын шығу тегін тіркеу; стандартты шығу тегі модельдерінде радиоқабылдау туралы мәліметтердің болмауы; нақты қауіп моделіне байланыстырылмаған тұтастық туралы тұжырымдар; жетіспейтін деректерді конвейер кезеңдеріне жатқызудың болмауы. Бұл олқылықтар деректердің шығу тегін қолдайтын LoRaWAN платформасына қойылатын бес талапты анықтайды: соңғы құрылғыларды өзгертпей, барлық кезеңдерде шығу тегін тіркеу; радиоқабылдау туралы мәліметтерді қамтитын стандартты шығу тегі моделі; белгіленген қауіп моделі аясында сақталған шығу тегі деректеріндегі рұқсатсыз өзгерістерді анықтау; шектелген қосымша шығындар; жетіспейтін деректерді конвейер кезеңдеріне жатқызу. Диссертацияда осы талаптарға сай келетін фреймворк әзірленді.

**Зерттеудің мақсаты мен міндеттері.** Диссертацияның мақсаты LoRaWAN негізіндегі ақылды қала мониторинг жүйелерінде ауа сапасы туралы деректерді бақыланатын және рұқсатсыз өзгерістерді анықтайтын түрде басқаруға арналған, платформа жағында деректердің шығу тегін қолдайтын фреймворк әзірлеу.

Осы мақсатқа жету үшін диссертацияда төрт **міндет** шешіледі:

1. IoT деректерінің шығу тегіне қатысты қолданыстағы тәсілдерді талдау және олардың ақылды қала мен LPWAN желілеріндегі шектеулерін анықтау;
2. LoRaWAN негізіндегі мониторингке арналған, деректердің шығу тегін, тұтастығын және жетіспейтін деректердің себебін анықтауға мүмкіндік беретін жеңілдетілген модельді әзірлеу және ресімдеу;
3. шығу тегі туралы жазбаларды жинақтайтын, сақтайтын, тексеретін және осы жазбалар негізінде шығу тегі графының көріністерін қайта құрастыратын платформалық прототипті әзірлеу және енгізу;
4. прототипті LoRaWAN мониторинг жүйесінде және имитациялық ортада келесі тұрғылардан бағалау: деректердің толықтығы мен жетіспейтін деректердің себептерін анықтау, платформаның қосымша жүктемесі, тұтастықты тексеру өнімділігі және деректердің шығу тегін қадағалау мүмкіндігі.

**Зерттеу нысаны**. LoRaWAN негізіндегі ақылды қала мониторинг жүйелеріндегі IoT өлшеу деректерінің өмірлік циклі.

**Зерттеу пәні**. Платформа деңгейіндегі өлшеу деректерінің өмірлік циклі барысында олардың шығу тегін тіркеуге, оның тұтастығын қорғауға және деректердің қадағалануын қамтамасыз етуге арналған әдістер мен тетіктер жиынтығы.

**Зерттеу әдістері.** Зерттеу төрт түрлі әдісті біріктірді, атап айтқанда аналитикалық, жобалау, эмпирикалық және модельдеу әдістері. Аналитикалық кезеңге PRISMA 2020 сәйкес жүргізілген жүйелі әдебиеттерге шолу кірді, онда IoT деректерінің шығу тегі, тұтастықты қорғау, деректердің толықтығы және LPWAN байланысы қарастырылды және ұсынылған құрылымға қойылатын талаптар анықталды. Содан кейін жобалау кезеңі мұндай талаптарды платформалық архитектураға және шығу тегінің генерациясының, тұтастықты тексерудің және жетіспейтін деректердің атрибуциясының ресми моделіне айналдырды. Сонымен қатар, әрбір жоғары байланыс желісін қабылдағаннан кейін шығу тегі туралы ақпаратты алу, оны әрбір құрылғы үшін хэш-байланысқан тізбектерде сақтау, әрбір тізбектің тұтастығын тексеру және бақылау сұраулары үшін графикалық көріністерді қайта құру үшін функционалдық прототип енгізілді.

Одан кейін эмпирикалық кезең прототипті ауа сапасын бақылау үшін 12 айлық LoRaWAN орналастыру арқылы деректердің толықтығы, артқы жағының қабылдау өнімділігі, сақтау шығындары, шығу тізбектерін тексеру уақыты, бұрмалауды анықтау және бақылау тұрғысынан бағалады. Жетіспейтін деректердің атрибуциясы компьютерлік модельдеу арқылы бағаланды. Нақтырақ айтқанда, радио қабаты ns-3 желілік симуляторымен және оның LoRaWAN модулімен модельденді, ал анықталған себептерді шынайы себептермен салыстыру үшін белгілі себептері бар құрылғылардың, шлюздердің және платформаның істен шығулары қосылды.

**Диссертацияның ғылыми жаңалығы**

LoRaWAN мониторингі үшін платформалық шығу тегі моделі ұсынылады, онда шлюзді қабылдау дәлелі айқын W3C PROV нысаны болып табылады және құрылғыларға немесе хаттамаға ешқандай өзгерістер енгізу қажет емес, бұл сақталған өлшемдерді олардың қабылдау дәлеліне кері және алға қарай қадағалау арқылы расталады.

LoRaWAN жоғары байланысының өмірлік цикліне бейімделген, әрбір құрылғы үшін хэш тізбектері мен тізбек басының бақылау нүктелерін біріктіретін, жазба өзгерісінің бес түрін анықтаған және 5,87 секундта 403 900 жазбаны тексерген, бұзылмаған өлшемдерді кезеңдік деңгейде атрибуциялау әдісі ұсынылады.

Жоғары деңгейдегі атрибуциялау әдісі ұсынылады, ол жиынтық толықтық метрикасынан айырмашылығы, деректер құрылғыда, жоғары ағында, платформа қабылдау кезінде немесе өңдеу кезінде жоғалғанын анықтайды, ns-3 модельдеуіндегі 270 107 атрибуцияланған өлшемдерде 3 қате бар.

**Қорғауға ұсынылатын негізгі тұжырымдар:**

1. Платформа жағындағы шығу тегіне негізделген LoRaWAN құрылымының архитектурасы ауа сапасын бақылауға бағытталған, шығу тегін тіркейді, оның тұтастығын тексереді және LoRaWAN хаттамасын немесе сенсорлық түйіндердің пайдалы жүктемесін өзгертпей жетіспейтін деректерді анықтайды.

2. W3C PROV нысандары, әрекеттері және агенттері арқылы қабылдау, қабылдау және сақтау кезеңдерін, соның ішінде шлюздерде қабылдау дәлелдерін көрсететін және сақталған өлшемдердің кері және алға қарай бақылануын қолдайтын LoRaWAN жоғары байланыстарының өмірлік циклінің шығу тегін сақтау моделі.

3. Әрбір құрылғыға арналған хэш-байланысқан тізбектерге және тізбек бастарының бақылау нүктелеріне негізделген шығу тегін бұрмалауға болатын сақтау әдісі, ол көрсетілген сенім болжамдары бойынша жазбалардың өзгертілуін, жойылуын, енгізілуін және қайта реттелуін, сондай-ақ тізбек құйрығының қысқартылуын анықтайды.

4. Әрбір кезең деңгейінде жетіспейтін өлшемдерді анықтау әдісі, ол платформа мен желілік сервер жазған дәлелдерді пайдаланады, әрбір жетіспейтін өлшемді кезеңдердің біріне (яғни, құрылғыға, жоғары ағынға, платформаны қабылдауға немесе өңдеуге) тағайындайды немесе оны анықталмаған деп жіктейді.

**Ғылыми нәтижелер**

1. PRISMA 2020 сәйкес жүйелі әдебиеттерге шолу жүргізілді. Scopus, Web of Science және қосымша дереккөздерден алынған 1201 жазбаның ішінде шолуға 90 зерттеу енгізілді. Нәтижелерге сәйкес, қолданыстағы тәсілдер платформа жағындағы деректерді жинауды, LoRaWAN үшін жарамдылықты, бұрмалауға қарсы сақтауды, бақылауды және жетіспейтін деректерді атрибуциялауды сирек біріктірді.

2. Ауа сапасын бақылауға бағытталған шығу тегін ескеретін LoRaWAN құрылымы жасалды және енгізілді. Нақтырақ айтқанда, құрылым әрбір жоғары байланыс желісін қабылдағаннан кейін қабылдау, өңдеу және сақтау дәлелдерін хаттаманы немесе сенсорлық түйіндердің пайдалы жүктемесін өзгертпей жинайды.

3. Шығу тегі мен тұтастықтың ресми моделі жасалды. Модель құрылғылар, жоғары байланыс желілері, шлюз қабылдаулары, өлшеулер және шығу тегі жазбалары үшін тұрақты идентификаторларды анықтайды және платформа жағындағы өмірлік циклді үш әрекет арқылы (яғни, RX, INGEST және STORE) көрсетеді. Атап айтқанда, орналастыру нәтижесінде 135 000 RX, 135 000 INGEST және 133 900 STORE жазбалары алынды.

4. Құрылғыға хэш-байланысты тізбектерге және тізбек бастарының бақылау нүктелеріне негізделген бұрмалауға қарсы сақтау әдісі жасалды. 403 900 жазбаны тексеру 5,87 секундты алды (яғни, жазбаға 0,0145 мс) және тексерілген бес өзгеріс түрі де анықталды. Олардың ішінде тізбек құйрығының қысқаруы 0,94 мс бақылау нүктелерін салыстыру арқылы анықталды.

5. PROV стиліндегі график көріністерін сұраныс бойынша қалпына келтіру әдісі жасалды. Әдіс тұрақты жаһандық графикті сақтамай, сақталған өлшемнен оның бастапқы сілтемесіне дейін кері қадағалауды және жоғары сілтемеден сақталған жазбаларына дейін алға қадағалауды қолдайды.

6. Жүйелік негіз үш сенсорлық түйін мен екі шлюзді қамтитын, 12 айға созылған тәжірибелік қолданыс барысында бағаланды. Нәтижесінде 135 000

логикалық жоғары бағытты байланыс (uplink), 133 900 сақталған өлшем және 403 900 деректердің шығу тегі туралы жазба (provenance record) қалыптасты. Деректердің толықтық көрсеткіші 84,9%-ға жетті, ал дерекқор көлемі 164,08 МБ құрады; мұның 114,14 МБ-ы деректердің шығу тегі туралы жазбаларға тиесілі болды.

7. 10 рет қайталау арқылы 5 000 логикалық жоғары бағытты байланысты қамтитын салыстырмалы өнімділік сынағы (benchmark) жүргізілді. Нәтижелерге сәйкес, деректердің шығу тегін тіркеу процесі әрбір байланыс үшін өңдеудің медианалық кідірісін 1,565 мс-тен 2,189 мс-ке дейін (яғни, 0,62 мс-ке) арттырды.

8. Әр кезеңдегі жетіспейтін өлшемдерді тиісті кезеңге жатқызу әдісі симуляциялар арқылы бағаланды. Бұл ретте ns-3 ортасына негізделген және нақты қолданыс жағдайына сәйкестендірілген радио деңгейі (radio layer) пайдаланылды. Бір жылдық кезеңді қамтитын 20 сынақ сериясы барысында, тиісті кезеңге жатқызылған 270 107 өлшемнің тек 3-еуі ғана қате кезеңге тіркелгені анықталды. Сонымен қатар, қамту деңгейі 66,4%-ға жетті (құрылғылардың қайта қосылуын есепке алмағанда - 93,7%), ал желілік сервердің оқиғалар журналы қолжетімсіз болған жағдайда дәлдік көрсеткіші 96,5%-ға дейін төмендеді.

**Жұмыстың теориялық және практикалық маңыздылығы.**

**Диссертацияның теориялық маңыздылығы** LPWAN технологияларына негізделген мониторинг жүйелері үшін ұсынылған шығу тегі моделінде жатыр. Модель платформа жағындағы IoT өлшеулерінің өмірлік циклін, жоғары байланыс желісін қабылдаудан бастап дерекқорда сақтауға дейін көрсетеді және шығу тегі туралы ақпаратты алуды, оның тұтастығын тексеруді және жетіспейтін деректерді анықтауды біріктіреді. Сонымен қатар, ұсынылған модель шектеулі ресурстары бар IoT орталарында тексерілетін деректер тегі мен деректердің толықтығына қатысты одан әрі зерттеулер үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

**Жұмыстың практикалық маңыздылығы** ақылды қалаларда ауа сапасын бақылау үшін енгізілген шығу тегіне негізделген LoRaWAN прототипінде жатыр. Прототип платформа жағында, LoRaWAN хаттамасын немесе сенсорлық түйіндердің пайдалы жүктемесін өзгертпей жұмыс істейді және жетіспейтін өлшемдерді, декодтаудағы ақауларды және шығу тізбектерінің тұтастығын бұзуды талдауға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, нәтижелер желілік сервердің оқиғалар журналын платформа коллекторынан тәуелсіз сақтау керектігін көрсетеді, себебі басқа жағдайда платформаның ақауларын радио жолындағы шығындардан ажырату мүмкін емес.

**Осы жұмыстың басқа зерттеу жобаларымен байланысы.** Осы диссертацияда ұсынылған зерттеу «*Қоршаған ортадағы климаттық және экологиялық өзгерістерді талдауға және мониторингтеуге арналған бағдарламалық-аппараттық кешен*» жобасы аясында (Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің AP05134597-OT-20 нөмірлі гранты, 2018–2020 жж.) басталды. Сонымен қатар, зерттеу жұмыстарының

жалғасы жас ғалымдарға арналған «Жас ғалым» жобасы аясында (AP32523239 нөмірлі грант, 2026-2028 жж.) жүргізілетін болады.

**Жұмыстың апробациясы.** Диссертацияның негізгі тұжырымдары мен ғылыми нәтижелері төмендегі конференцияларда ұсынылып, талқыланды:

1. Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің (Алматы, Қазақстан) Компьютерлік инженерия кафедрасындағы семинарлар;
2. «Smart Information Systems and Technologies» (SIST 2025) атты 5-ші халықаралық конференция (Астана, Қазақстан);
3. Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінде (Алматы, Қазақстан) өткен «Математика, механика және ақпараттық технологиялар» (ICMMIT 2025) атты X халықаралық ғылыми конференциясы;
4. Astana IT University-де (Астана, Қазақстан) өткен семинар (28 тамыз, 2026 жыл);.
5. Vaughn College of Aeronautics and Technology (Нью-Йорк, АҚШ) ұйымдастырған «Digital Technologies and Applications» (ICDTA 2026) халықаралық конференциясы (9-10 қазан, 2026 жыл).

Диссертация нәтижелері SDU университетінде (Қаскелең, Қазақстан) енгізілді; бұл Е қосымшасында берілген енгізу актісімен расталады.

**Ғылыми жарияланымдар.** Ғылыми жарияланымдар. Диссертация нәтижелері 6 ғылыми еңбекте жарияланды, атап айтқанда: Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің (ҚР ҒЖБМ) Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда 3 мақала, Scopus және Web of Science (WoS) дерекқорларына енгізілген журналдарда 2 мақала және халықаралық конференция материалдарында 1 мақала жарық көрді.

1. **B. Imankulova**, W. M. S. Yafooz, K. Alshammari, B. Alshemali, A. E. Yahya and A. Abd Almisreb. Tracing Data Origins in Smart Cities: An IoT Perspective. IEEE Access. 2025. Vol. 13, pp. 130201-130214. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3591277 [WoS Q2, Scopus percentile: 91, Cite Score(2025): 9.3, available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11087496]
2. Mukash Zh., Bakranova D., Serikkanov A., Bakranov N., **Imankulova B.** Energy-Aware AI-Enabled Intelligent Sensing Systems for IoT and Edge–Cloud Architectures. Sensors 2026, Volume 26, Issue 21, 6927, 10.3390/s26216927 [WoS Q2, Scopus percentile: 83, Cite Score (2025): 9.4]
3. **B. Imankulova**, A. Sagymbekova. Privacy Challenges in Environmental IoT Systems: A Case Study on Air Quality Monitoring, 2025 IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIST61657.2025.11139338 [Scopus]
4. **Imankulova B.B**. Privacy challenges and framework design for IoT devices: A comprehensive approach. Bulletin of AUPET. 2025. Vol. 68, Issue 1. p. 256–267. DOI: https://doi.org/10.51775/2790-0886_2025_68_1_256 [КОКНВО]
5. **Imankulova, B. B**., Kozina, L. A., Duzbayev, N. T., Amanzholova, S. T. Transmission, storage and preprocessing of data received from sensors using LoRa technology. Bulletin of AUPET. 2024. Vol. 64, Issue 1. p.16-24. DOI: https://doi.org/10.51775/2790-0886_2024_64_1_16 [КОКНВО]

1. 6. **Imankulova B.B.**, Amanzholova S.T., Duisebekova K.S. Software and technical aspects of data collection from end nodes: problems and prospects. Bulletin of AUPET. 2020. Vol. 51, Issue 4. p.164-172. DOI: https://doi.org/10.51775/1999-9801_2020_51_4_164 [КОКНВО]

**Диссертацияның негізгі мазмұны**

1-тарауда «ақылды қала» (smart city) жүйелеріндегі заттар интернеті (IoT) деректерінің шығу тегін (data provenance) анықтауға қатысты қазіргі жағдайға шолу жасалады. Бұл тарауда шығу тегі ұғымы, «ақылды қала» деректеріне қойылатын талаптар, деректерді ұсыну модельдері, тұтастықты қамтамасыз ету тетіктері мен деректердің толықтығы қарастырылады. Сондай-ақ, PRISMA 2020 әдістемесіне сәйкес жүргізілген жүйелі әдебиеттерге шолу ұсынылады. Шолу нәтижесінде зерттеудегі төрт олқылық (research gaps) анықталып, деректердің шығу тегін ескеретін LoRaWAN платформасына қойылатын бес талап тұжырымдалды.

2-тарауда ұсынылған тұжырымдамалық негіздің (framework) жобасы баяндалады. Мұнда жобалау қағидаттары мен көп деңгейлі архитектура, LoRaWAN байланыс стегімен интеграция, сондай-ақ қауіп-қатер моделі және қауіпсіздік тұжырымдамасының нақты мағынасы сипатталады. Одан әрі жүйенің формальды моделі, атап айтқанда, жүйе компоненттері мен идентификаторлары, шығу тегі туралы жазбалар мен графтар, сондай-ақ шығу тегін қалыптастыру, тұтастықты тексеру және жетіспейтін деректердің себебін анықтау (attribution) модельдері ұсынылады. Тарау соңында шығу тегі туралы деректерді сақтау және тексеру процестері сипатталады.

3-тарауда ұсынылған жүйені іске асыру мәселелері қарастырылады. Оған платформа архитектурасы, нақты жағдайда (далада) орнату, MQTT хаттамасы арқылы деректерді қабылдау және шығу тегін тіркеу, деректерді сақтау схемасы, тұтастықты тексеру рәсімі, шығу тегіне қатысты сұраныстар және жетіспейтін деректердің себебін анықтау процедурасы кіреді.

4-тарауда ұсынылған жүйе 12 ай бойы қолданыста сынақтан өткізіліп, оның тиімділігі бағаланады. Бағалау деректердің толықтығы, байланыс сапасы және деректерді беру жылдамдығын бейімдеу (ADR) механизмінің жұмысы, сақтау және өңдеуге кететін қосымша шығындар, тұтастықты тексеру және қадағалау мүмкіндігі тұрғысынан жүргізіледі. Сонымен қатар, ns-3 ортасына негізделген LoRaWAN радио деңгейін қолдана отырып, жетіспейтін деректердің себебін анықтау мүмкіндігі белгілі бір себептерге қатысты модельдеу арқылы бағаланады. Тарау соңында ұқсас зерттеулермен салыстыру келтіріліп, ұсынылған жүйенің шектеулері талқыланады.

Қорытынды бөлімінде диссертацияның негізгі нәтижелері мен ғылыми үлесі жинақталады, ұсынылған жүйенің шектеулері көрсетіледі және болашақ зерттеу бағыттары белгіленеді.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі**

Диссертация 155 беттен тұрады; оның құрамында 34 сурет, 22 кесте, 171 дереккөзден тұратын тізім және 4 қосымша бар.