

Тогисбаева Айнура Мухтаровнаның «Оңтүстік-Шығыс Қазақстан жағдайында жеміс дақылдарының агроэкожүйесін интеллектуальды экологиялық мониторингілеу үшін ІТ технологияларды әзірлеу» тақырыбындағы 8D05204 – «Экология» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған диссертациялық жұмысының

АҢДАТПАСЫ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Іле Алатауының тау бөктері аймағы жеміс дақылдарының жоғары өнімділік әлеуетін климаттық осалдықтың артуымен үйлестіреді. Зерттеу кезеңінде (2021–2024 жж.) ауаның орташа жылдық температурасы климаттық нормадан 2,6–3,7 °С-қа асып, вегетация кезеңіндегі жауын-шашын тапшылығы 15–30%-ға жетті, ал көктемгі кеш бозқырау жиілігі артып, жылына байланысты өнімнің 15–70%-ға дейін жоғалуын тудырды. Мұндай жағдайда агроэкожүйелердің цифрлық экологиялық мониторингіне көшу бағбандықты тұрақты басқарудың қажетті құралына айналады.

Зерттеу тақырыбының ғылыми зерттелу деңгейі. Зияткерлік ауыл шаруашылығының қолданыстағы шешімдері негізінен қоңыржай белдеудің ірі астық өндіретін шаруашылықтарына бағытталған және Орталық Азияның құрғақ жағдайларындағы көпжылдық жеміс екпелерінің физиологиясын ескермейді. Жерүсті IoT-сенсорларын, спутниктік вегетациялық индекстерді және машиналық оқыту алгоритмдерін Оңтүстік-Шығыс Қазақстанның алма бағына қатысты біріктіретін кешенді жүйе бұрын жасалмаған, бұл зерттеудің өзектілігін айқындайды. Тақырып «Қазақстан-2050» Стратегиясының, «Жасыл Қазақстан» ұлттық жобасының және БҰҰ Тұрақты даму мақсаттарының (ТДМ 2, 6, 12, 15) басымдықтарына сәйкес келеді. Зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің 217 «Ғылымды дамыту» бюджеттік бағдарламасы (101 «Бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру» кіші бағдарламасы) аясында, BR05236444 тақырыбы бойынша № 154 шарт шеңберінде орындалды. Дала бақылаулары Оңтүстік-Шығыс Қазақстанның жеміс дақылдары агроэкожүйелерінің экологиялық мониторингі бойынша көпжылдық базалық деректер циклінің бөлігі болды және елдің агроөнеркәсіптік кешенін тұрақты дамыту басымдықтарымен үйлеседі.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері. Зерттеудің мақсаты — Оңтүстік-Шығыс Қазақстан жағдайында екпелерді басқаруды оңтайландыру және жемісшіліктің экологиялық тұрақтылығын арттыру үшін IoT-сенсорларды, спутниктік зондтауды және машиналық оқыту әдістерін біріктіру негізінде алма бағы агроэкожүйесінің зияткерлік экологиялық мониторингінің ІТ-технологиясын әзірлеу және ғылыми негіздеу.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

- климаттың жаһандық өзгеруі жағдайында Қазақстанның оңтүстік-шығысындағы алма бақтары агроэкожүйесінің топырақ-климаттық жағдайлары мен экологиялық жай-күйіне кешенді талдау жүргізу;

- қоршаған ортаның абиотикалық параметрлерінің бірыңғай деректер базасын құра отырып, IoT-технологиялары негізінде агроэкожүйені мониторингтеу жүйесін әзірлеу;
- мониторинг жүйесі арқылы инновациялық технологияның су-ресурс үнемдеуші тәсілдерінің бақ агроэкожүйесінің топырақ-биологиялық ресурстары мен өнімділігіне әсерін зерттеу;
- IT-мониторинг деректері негізінде қоршаған ортаның абиотикалық және антропогендік факторларының өндірістік қарқынды бақ агроэкожүйесінің жұмыс істеуіне әсерін бағалау;
- оңтүстік-шығыс Қазақстан жағдайында алма өсіруді оңтайландыру үшін мониторингтің IT-технологиясын қолданудың экологиялық орындылығы мен экономикалық тиімділігін негіздеу.

Зерттеу нысаны мен пәні. Зерттеу объектісі — Іле Алатауының тау бөктері аймағындағы (Түрген ауылы, Алматы облысы; 43°24' с.е., 77°35' ш.б.; теңіз деңгейінен 980–1020 м биіктік) ауданы 10 га интенсивті алма бағының агроэкожүйесі. Сорттық құрамы: Голден Делишес — 40 %, Американка — 30 %, Апорт — 20 %, Ренет Симиренко — 10 %; отырғызу тығыздығы 500 ағаш/га; топырақ — кара-қоңыр. Зерттеу пәні — зияткерлік IT-мониторинг әдістерімен анықталатын агроэкожүйенің жұмыс істеу заңдылықтары және қоршаған ортаның абиотикалық факторлары, басқару әсерлері мен жеміс екпелерінің өнімділігі арасындағы сандық өзара байланыстар.

Зерттеудің теориялық және әдіснамалық негізі. Жұмыста IoT-мониторинг әдістері (ESP32-WROOM-32 микроконтроллерлері; SHT31, BME280, DS18B20 сенсорлары), машиналық оқыту әдістері (Random Forest, Gradient Boosting, Logistic Regression, көпқабатты перцептрон MLP), жерді қашықтықтан зондтау (Sentinel-2, EOSDA Crop Monitoring платформасы; NDVI, NDWI, MSAVI, NDRE индекстері), Б.А. Доспехов бойынша дала тәжірибесінің классикалық әдістері, топырақ әдістері (ГОСТ 26213-91, ГОСТ 28268-89), су тұтынуды есептеу (FAO-56), KEAA₀₅ бағалау арқылы дисперсиялық талдау қолданылды.

Зерттеудің ақпараттық базасы. Зерттеудің ақпараттық базасын «MOM SENSOR» кешенінің үздіксіз IoT-мониторингі деректері (2021–2024 жж. 2,1 млн-нан астам өлшем), Sentinel-2 қашықтықтан зондтау материалдары (EOSDA арқылы), «Қазгидромет» РМК деректері, сондай-ақ 10 га алма бағындағы (Түрген ауылы) далалық бақылаулар мен зертханалық талдау нәтижелері құрады.

Ғылыми жаңалық. – алғаш рет Орталық Азияның құрғақ жағдайларындағы көпжылдық жеміс дақылдарының ерекшелігіне бейімделген алты деңгейлі IoT экологиялық мониторинг архитектурасы әзірленді; – алғаш рет бақтың агроклиматтық тәуекелдерін болжауға арналған, IoT-сенсорлар деректерімен және спутниктік вегетациялық индекстермен біріктірілген бес машиналық оқыту моделінің кешені құрылып, тексерілді; – алғаш рет үздіксіз IoT-мониторинг әдісімен кара-қоңыр топырақтың су режимі динамикасының сандық заңдылықтары анықталып, iNDVI интегралдық индексінің өнімділікпен тығыз корреляциясы ($r = 0,91$) дәлелденді; – алғаш рет Оңтүстік-Шығыс

Қазақстан жемісшілігі үшін зияткерлік мониторинг жүйесінің кешенді экологиялық-экономикалық бағасы орындалды.

Автордың жеке үлесі. Зерттеудің барлық кезеңдері автормен дербес орындалды. Автор «MOM SENSOR» аппараттық-бағдарламалық кешенінің архитектурасы мен бағдарламалық қамтамасыз етуін әзірледі, TimescaleDB және PostGIS кеңейтімдері бар PostgreSQL геокеңістіктік деректер базасын жобалады, агроклиматтық тәуекелдерді болжауға арналған бес машиналық оқыту моделінің кешенін іске асырды, жүйені Sentinel-2 (EOSDA Crop Monitoring) спутниктік қашықтықтан зондтау платформасымен біріктірді және білім беру веб-порталын құрды.

Автор кешеннің аппараттық бөлігін — ESP32-WROOM-32 микроконтроллерлері негізіндегі, SHT31, BME280, DS18B20 датчиктері және автономды энергиямен қамтамасыз етілген төрт автономды сенсорлық станцияны — жеке құрастырып, орнатты; Іле Алатауының тау бөктері аймағындағы 10 га өндірістік алма бағында төрт жылдық далалық тәжірибелерді (2021–2024 жж.) жүргізді.

Автор эксперименттік деректерді (2,1 млн-нан астам өлшем) жинау мен статистикалық өңдеуді, нәтижелерді талдауды және әзірленген IT-технология тиімділігіне кешенді экологиялық-экономикалық бағалауды, сондай-ақ диссертация тақырыбы бойынша ғылыми жарияланымдарды дайындау мен нәтижелерді халықаралық конференцияларда сынақтан өткізуді орындады.

Қорғауға ұсынылатын негізгі ғылыми тұжырымдар.

- «MOM SENSOR» кешенінің алты деңгейлі IoT-архитектурасы алма бағы агроэкожүйесінің үздіксіз экологиялық мониторингін деректердің орташа толықтығы 96,5 % және қызмет қолжетімділігі 97,2 % деңгейінде қамтамасыз етеді;
- бес машиналық оқыту моделінің кешені бақтың агроклиматтық тәуекелдерін практикалық тұрғыдан маңызды дәлдікпен болжауға мүмкіндік береді (бозқырау болжамы: $F1 = 0,64$, $AUC-ROC = 0,82$);
- iNDVI интегралдық индексі өнімділікпен ($r = 0,91$; $p < 0,01$), ал NDWI индексі топырақ ылғалдылығы деректерімен ($r = 0,81$) тығыз байланысты, бұл агроэкожүйе жай-күйін қашықтан бағалауды негіздейді;
- суды үнемдейтін технологияларды (тамшылатып суару мен AQUASORB гидрогелін үйлестіру) қолдану суды пайдалану тиімділігі мен өнімділікті арттырып, суару суының алынуын төмендетеді;
- IT-технологияны енгізу топырақ құнарлылығының көрсеткіштерін жақсартады (гумус мөлшері 3,78-ден 4,02 %-ға дейін артады) және агроэкожүйеге пестицидтік жүктемені азайтады;
- кешенді экологиялық-экономикалық баға Оңтүстік-Шығыс Қазақстан жағдайында әзірленген IT-технологияның жоғары тиімділігін растайды.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы. Теориялық маңыздылығы. Нәтижелер агроэкожүйелердің экологиялық мониторингі әдіснамасын дамытуға үлес қосады: көпжылдық жеміс дақылдарына арналған көп деңгейлі IoT-жүйелерді құру қағидаттары негізделді, қашықтықтан

алынатын индекстердің өнімділік пен су режимімен сандық байланысы анықталды, бұл құрғақ аймақтарда бағбандықты цифрлық басқарудың ғылыми негізін жасайды. Практикалық маңыздылығы. «MOM SENSOR» IT-технологиясы Іле Алатауының тау бөктеріндегі ауданы 10 га алма бағын басқару практикасына енгізілді. Нәтижелерді ауыл шаруашылығы кәсіпорындары жемісшіліктің тиімділігі мен экологиялық тұрақтылығын арттыру үшін, сондай-ақ аграрлық жоғары оқу орындарының оқу процесінде пайдалана алады. Экономикалық тиімділігі: рентабельділік 1396 %, өтелу мерзімі бір айдан аз, жиынтық жылдық экономикалық әсер 10 га-ға 16128 мың теңге. Негізгі нәтижелер. Алты деңгейлі IoT-архитектураны жүзеге асыратын «MOM SENSOR» мониторинг ақпараттық жүйесі әзірленді: сенсорлық деңгей (ауа температурасы мен ылғалдылығы, атмосфералық қысым, топырақ температурасы мен ылғалдылығы, жел жылдамдығы мен бағыты сенсорларымен жабдықталған, күн панельдерінен қоректенетін және GSM/GPRS арқылы 15 минут сайын дерек жіберетін ESP32 негізіндегі төрт автономды станса), дерек беру деңгейі, геокеңістіктік қойма (TimescaleDB және PostGIS кеңейтімдері бар PostgreSQL), машиналық оқытудың талдау модулі, спутниктік мониторинг модулі және оқу веб-порталы. Төрт жылдық пайдалану кезеңінде (2021–2024 жж.) 2,1 млн-нан астам телеметриялық жазба жинақталды. Бес машиналық оқыту моделінің кешені құрылды: бозқырауды болжау (Random Forest, $F1 = 0,64$, $AUC-ROC = 0,82$, 24 сағаттық көкжиек), су стресін бағалау (Gradient Boosting, $R^2 = 0,85$), аурулар қаупін бағалау (Logistic Regression, $AUC = 0,78$, 72 сағаттық көкжиек), суаруды оңтайландыру (MLP, $MAE = 15\%$, 7 тәуліктік көкжиек) және зиянкестер белсенділігін болжау (Gradient Boosting, $AUC = 0,72$). Сенсорлық желінің дәлдігі «Қазгидромет» метеостансасымен салыстыру арқылы расталды (ауа температурасы бойынша 0,98 және салыстырмалы ылғалдылық бойынша 0,95 корреляция коэффициенттері). Сандық заңдылықтар анықталды: iNDVI-дің өнімділікпен корреляциясы $r = 0,91$ ($p < 0,01$), NDWI-дің топырақ ылғалдылығы деректерімен корреляциясы $r = 0,81$. Зерттеу жылдарындағы өнімділік 248, 152 және 201 ц/га (2021, 2022 және 2024 жж.) болды, бұл климаттық өзгергіштікті көрсетеді. AQUASORB гидрогелін (оңтайлы мөлшері 40 г/ағаш) қолдану өнімділікті 168-ден 212 ц/га-ға дейін (+26 %) арттырды, суды пайдалану тиімділігі $12,8 \text{ кг/м}^3$ болды; борпылдақ суарудан тамшылатып суаруға көшу өнімділікті 12,7-ден 15,2 т/га-ға дейін (+20–25 %) арттырды, ал су тұтыну коэффициенті 120–130-дан 80–90 л/кг-ға дейін төмендеді. Вегетация кезеңіндегі жиынтық су тұтыну (ETc) 602,1 мм болды. Жалпы алғанда, IT-технология өнімнің 26 %-ға артуын (212-ге қарсы 168 ц/га), суару суының 26 %-ға үнемделуін (4,6-ға қарсы 6,2 мың $\text{м}^3/\text{га}$), пестицидтік өңдеулердің 25 %-ға қысқаруын, көктемгі кеш бозқыраудан болатын жоғалтулардың азаюын, гумус мөлшерінің 3,78-ден 4,02 %-ға өсуін және топырақтың биологиялық белсенділігінің 34–50 %-ға жоғарылауын қамтамасыз етті. Нәтижелердің дұрыстығы заманауи стандартталған зерттеу әдістерін қолданумен, деректердің репрезентативті көлемімен (2,1 млн-нан астам өлшем), сенсорлық желіні «Қазгидромет» деректерімен метрологиялық тексерумен және нәтижелерді

дисперсиялық талдау арқылы 5 % маңыздылық деңгейінде (KEAA₀₅) статистикалық өңдеумен қамтамасыз етілген.

Зерттеу нәтижелерінің апробациясы және енгізілуі. Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері халықаралық ғылыми-практикалық конференцияларда баяндалып, талқыланды: «Trends in the development of science and practice» XV Халықаралық ғылыми конференциясы (Мадрид, Испания, 2021); European Academic Science and Research XXXIV Халықаралық конференциясы (Гамбург, Германия, 2022); Ангел Кънчев атындағы Русе университетінің ғылыми конференциясы (Русе, Болгария, 2022); академик Қ.С. Сәбденовтің 90 жылдығына арналған жас ғалымдар мен студенттердің халықаралық ғылыми-практикалық конференциясы (ҚазҰАЗУ, Алматы, 2023); ТМД жас ғалымдарының IV Халықаралық ғылыми-практикалық симпозиум-байқауы (2023, жұмыс I дәрежелі дипломмен марапатталды); «Ауыл шаруашылығындағы білім мен инновациялар» халықаралық ғылыми-практикалық симпозиумы (Ташкент, Өзбекстан, 2024).

Зерттеу нәтижелері «Freelancity» ЖШС өндірістік қызметіне енгізілді (01.03.2025 ж. ендіру актісі; М қосымшасы): коммерциялық пайдалануға MOM SENSOR бағдарламалық-аппараттық кешені, машиналық оқытудың бес моделі және мониторинг веб-порталы енгізілді. Диссертациялық зерттеу нәтижелерінің негізінде 2026 жылғы 21 сәуірде «Астана» Халықаралық қаржы орталығында (AIFC) әзірленген IT-технологияны коммерциялау мақсатында AISAAT Limited жекеменшік компаниясы тіркелді (тіркеу нөмірі AFSA-O-CA-2026-6009; П қосымшасы). Өндіріске әзірленген практикалық ұсыныстар Н қосымшасында келтірілген. «MOM SENSOR» IT-технологиясы Алматы облысы Түрген ауылындағы ауданы 10 га өндірістік алма бағын басқаруда қолданылады.

Жарияланымдар. Диссертация тақырыбы бойынша 11 ғылыми жұмыс жарияланды, оның ішінде Scopus деректер базасында индекстелген журналдарда 2 мақала (Biodiversity and Conservation, Q1; Journal of Water and Land Development), ҚР ҒЖБМ БҒСБК ұсынған басылымдарда 2 мақала (ҚазҰАЗУ «Ізденістер, нәтижелер» журналы) және халықаралық ғылыми-практикалық конференциялар материалдарында 7 жарияланым.

Негізгі жарияланымдар тізімі:

1 Effect of outdoor recreation on forest phytocenosis // Biodiversity and Conservation. – 2022. – Vol. 31. – P. 1893–1908 (Scopus, Q1). <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02425-6>

2 Ecological assessment of soil contamination with heavy metals under application of mineral fertilisers // Journal of Water and Land Development. – 2023. – No. 56. – P. 74–80 (Scopus). <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143747>

3 Садоводство в условиях изменения климата Юго-Восточного Казахстана с применением приёмов инновационной технологии (при выращивании яблони) // Изденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. КазНАИУ. – 2023. – №02(98). – С. 199–209.

4 Влияние абиотических факторов экосистемы на рост и развитие плодовой культуры (яблони) при изменении климата // Изденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. КазНАИУ. – 2024. – №02(102). – С. 63–73.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, алты тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады. Жалпы көлемі — қосымшаларсыз 150 бет, оның ішінде 54 сурет, 63 кесте, ал қосымшалармен бірге 270 бет, оның ішінде 124 сурет, 131 кесте және 12 қосымша (А–Н). Әдебиеттер тізімі 133 дереккөзді қамтиды, оның 98-і ағылшын тілінде.