

Жер сілкінісін ерте ескерту жүйелерін талдау және салыстырмалы бағалау: халықаралық тәжірибе және технологиялық тәсілдер

МАРАТОВА Карина Арманқызы, магистрант, ka.maratova@aues.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1048-5784>,

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан.

Аңдатпа. Жер сілкіністері туралы ерте ескерту жүйелері саласындағы халықаралық тәжірибе мен заманауи технологиялық шешімдер қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – әртүрлі елдерде енгізілген ерте ескерту жүйелерінің жұмыс істеу қағидаттарын, архитектуралық құрылымын және практикалық тиімділігін салыстырмалы бағалау, сондай-ақ, Қазақстан Республикасындағы сейсмикалық қауіпсіздікті дамыту ерекшеліктерін талдау. Жұмыста Жапония, АҚШ, Мексика және Түркияда қолданылатын локалды, аймақтық және гибридік жүйелер, сондай-ақ, сейсмикалық деректерді өңдеудің заманауи алгоритмдері мен ескерту сигналдарын жеткізу арналары зерттелді. Сонымен қатар, Қазақстандағы автоматтандырылған ерте ескерту жүйесінің қазіргі жағдайы мен даму бағыттары қарастырылды. Жүргізілген талдау негізінде ерте ескерту жүйелерін көпкритерийлі салыстырмалы бағалаудың төрт кезеңді әдістемесі ұсынылды. Мұндай жүйелердің тиімділігі сейсмикалық бақылау желісінің тығыздығына, деректерді өңдеу жылдамдығына, болжау дәлдігіне және хабарлау тетіктерінің сенімділігіне байланысты екендігі анықталды. Алынған нәтижелер ұлттық сейсмикалық мониторинг жүйесін жетілдіруге және сейсмикалық қауіпсіздік деңгейін арттыруға ғылыми және практикалық негіз болады.

Кілт сөздер: жер сілкінісі, ерте ескерту жүйелері, сейсмикалық мониторинг, сейсмикалық қауіп, халықаралық тәжірибе, гибридік жүйелер, сейсмикалық алгоритмдер, Р және S толқындары, ескерту сигналдары, хабарлау арналары, критикалық инфрақұрылым, тәуекелді төмендету.

Кіріспе

Жер сілкіністері – ауқымды қиратулар мен адам шығынына әкелетін қауіпті табиғи құбылыс.

Сейсмикалық қауіпсіздік Қазақстан Республикасының орнықты дамуының маңызды факторы болып табылады, өйткені ел аумағының шамамен 40%-ы сейсмоқауіпті аймақтарда орналасқан [1]. Ең жоғары қауіп оңтүстік-шығыс және шығыс өңірлерге тән (Алматы және Шымкент қалалары, Алматы, Жамбыл, Шығыс Қазақстан облыстары, сондай-ақ, Абай және Жетісу облыстары), мұнда MSK-64 шкаласы бойынша қарқындылығы 8-10 баллға жететін жойқын жер сілкіністері тарихи тұрғыдан тіркелген [1]. Мұндай апаттар жылу электр орталықтары, газ құбырлары және көлік желілері сияқты критикалық инфрақұрылым объектілерінің бұзылуына, сондай-ақ, ірі техногендік апаттарға әкелуі мүмкін. Осыған байланысты Қазақстан үшін халық пен инфрақұрылымды қорғауға ба-

ғытталған заманауи технологияларды енгізу стратегиялық маңызға ие.

Тиімді шешімдердің бірі – сейсмикалық толқындардың таралуына негізделген ерте ескерту жүйелері. Олар бастапқы фазаларды тіркеу арқылы жойқын тербелістерге дейін дабыл сигналын қалыптастырады және халық пен инфрақұрылымды қорғауға мүмкіндік беретін уақыттық басымдық береді.

Соңғы онжылдықтарда мұндай жүйелер сейсмикалық белсенді елдерде төтенше жағдайларды басқарудың маңызды бөлігіне айналды. Олардың тиімділігі бақылау желілерінің тығыздығына, деректерді өңдеу жылдамдығына, байланыс сенімділігіне және инфрақұрылыммен интеграция деңгейіне тәуелді, алайда, кейбір өңірлерде сигналдың кешігуі олардың мүмкіндіктерін шектейді.

Мақаланың мақсаты – әртүрлі елдерде енгізілген жер сілкіністерін ерте ескерту жүйелеріне талдау жасап, олардың технологиялық шешімдері мен жұмыс істеу ерекшелік-

терін салыстырмалы түрде бағалау. Зерттеу нәтижелері сейсмикалық қауіпті аймақтарда ерте ескерту жүйелерін жетілдіруге және ұлттық сейсмикалық мониторинг желілерін дамытуға арналған ғылыми негізделген ұсынымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістері

Бұл зерттеудің әдістемелік негізі кешенді тәсілге құрылған, оған теориялық талдау, салыстырмалы зерттеу және жер сілкінісінің ерте ескерту жүйелерінің жұмысын эмпирикалық түрде бағалау кіреді. Негізгі дереккөз ретінде «ҚР сейсмологиялық саласын дамытудың 2024-2028 жылдарға арналған кешенді жоспары» (ҚР Үкіметінің № 526 қаулысы) қарастырылды [1]. Сонымен қатар, Жапонияның «Табиғи апаттардан қорғау туралы негізгі заңы», АҚШ-тың ShakeAlert жүйесінің техникалық құжаттары және Түркияның AFAD ұлттық стратегиясы талданды [2, 3, 4]. Бұл құжаттарды салыстырмалы талдау жүйелердің архитектуралық талаптарын, сигналдық триггерлер параметрлерін және мемлекеттік органдар мен халық арасындағы өзара әрекеттестікті анықтауға мүмкіндік берді.

Технологиялық аспектілерді зерттеу үшін Қазақстандағы деректерді беру хаттамалары салыстырмалы талданып, сейсмикалық толқындардың таралуы физикалық-математикалық модельдеу арқылы қарастырылды [1]. Бұл тәсіл Жапония, АҚШ, Мексика, Түркия және Чилиде енгізілген жүйелердің архитектуралық шешімдерімен салыстырылды. Жүйелер сейсмикалық желі тығыздығы, датчик түрлері, сигнал өңдеу және ескерту тарату арналары бойынша жіктелді, сондай-ақ, жергілікті, аймақтық және гибридік модельдер ретінде қарастырылды [5, 6]. Архитектураны талдау желінің тығыздығы мен станциялардың географиялық орналасуының «көрінбейтін аймақтарды» азайтуға әсерін бағалауға мүмкіндік берді.

Сигналдарды өңдеу алгоритмдерін жүйелеу және классификациялау технологиялық тәсілдердің әртүрлілігін құрылымдауға қолданылды. Дәстүрлі параметрлік әдістер (ең үлкен ығысу, басым период) және нейрондық желілік модельдер, соның ішінде, Жапонияның KiK-net деректерімен оқытылған EEWNet қарастырылды [7]. Алгоритмдердің тиімділігі Successful Alert, False Alert, Missed Alert және Successful No-Alert көрсеткіштері арқылы бағаланып, 2023 жылғы Түркия-Сирия, 2011 жылғы Жапония және Калифорниядағы сейсмикалық оқиғаларды талдауға мүмкіндік берді [8].

Зерттеудің қосымша компоненті Р және S толқындарының таралуын сандық модельдеуді қамтыды. Бұл әдіс бастапқы толқындарды тіркеу мен жойқын тербелістер-

дің келуі арасындағы уақытты бағалауға және әртүрлі географиялық жағдайларда «көрінбейтін аймақтардың» параметрлерін анықтауға мүмкіндік берді. Модельдеу жер қыртысының гетерогенділігі, ошақ тереңдігі және топырақ қабаттарындағы толқын жылдамдығын ескере отырып, қалалық және жағалық аймақтарға арналған сценарийлерді құруға бағытталды. Модельдеу нәтижелері эмпирикалық деректермен біріктіріліп, болжам дәлдігін тексеруге және автоматты ескерту алгоритмдерін түзетуге қолданылды.

Эмпирикалық бөлім нақты сейсмостанциялар деректері негізінде ерте ескерту жүйелерінің жұмысын ретроспективті талдауды, ескерту уақыты мен жеткізу сенімділігін бағалауды қамтыды. Физикалық (қалалық сиреналар, мешіт дауыс күшейткіштері) және цифрлық (Cell Broadcast, мобильді қосымшалар, Жапониядағы J-Alert) коммуникациялық арналары зерттеліп, олардың апатты жағдайларда қоғам тұрақтылығына әсері бағаланды.

Әдіснама халықты даярлау мен ақпараттандырудың ерте ескерту жүйелерінің тиімділігіне әсерін бағалау үшін әлеуметтанулық талдау әдістерін қамтыды. Бұл тәсіл жүйелердің тиімділігін техникалық және әлеуметтік тұрғыдан кешенді бағалауға және ұлттық сейсмикалық мониторингті жетілдіруге ғылыми негіз қалады.

Ғылыми нәтижелер

Халықаралық тәжірибе жер сілкінісін ерте ескерту жүйелерінің үш негізгі архитектуралық тәсілін айқындайды: локалды, аймақтық (желілік) және гибридік [5]. Олардың артықшылықтары мен шектеулері датчик желісінің тығыздығына, аймақ рельефіне, сондай-ақ, болжау алгоритмдері мен сигнал жеткізу арналарына тәуелді.

Қазақстанның сейсмикалық қауіпсіздік жүйесі бастапқы (Р) толқындарды детекциялау қағидатына негізделген автоматтандырылған ерте ескерту жүйесі арқылы дамуда [9]. Оның физика-техникалық негізі толқындардың таралу жылдамдықтарының айырмашылығына негізделген: сейсмикалық толқын – шамамен 6 км/с, ал радиосигнал – 300000 км/с [9]. Бұл эпицентрден 60 км қашықтықта 10 секундтық қауіпсіздік терезесін қамтамасыз етеді, ол газ бен электр қуатын ажырату, лифттер мен пойыздарды тоқтату сияқты қорғаныс шараларын іске қосуға жеткілікті [9].

Ақпараттық инфрақұрылым тұрғысынан Mass Alert инновациялық хаттамасының енгізілуі маңызды жетістік болып танылды. Cell Broadcast технологиясына негізделген бұл жүйе дәстүрлі SMS-хабарламаларға тән желілік кептелістер мен кешігулерді жояды [10]. Технология 60000 секторды қамтып,

абоненттердің 90-97%-ына ескерту хабарламаларын «Darmen» қосымшасы арқылы 4 секунд ішінде жеткізуді қамтамасыз етеді [10].

Мониторинг желісін стратегиялық жаңғырту және аймақтық интеграция 2024-2028 жылдарға арналған мемлекеттік жоспар шеңберінде жүзеге асырылуда [1]. Қолданыстағы станциялардың жеткіліксіз жабдықталуын ескере отырып, 285 жаңа станция (95 стационарлық, 190 автономды) орнату жоспарлануда [1]. Сондай-ақ, Алматы, Шымкент және Өскемен қалаларында ғимараттардың сейсмикалық төзімділігіне инвентаризация жүргізу және «Цифрлық архив» құру көзделген [1]. Аймақтық деңгейде Қазақстан, Қырғызстан және Өзбекстанның сейсмикалық және гидрологиялық датчиктерін біріктіретін бірыңғай жүйе құру бастамасын көтерді [1].

Жапонияда JMA/UrEDAS жүйесі ең технологиялық тұрғыдан интеграцияланғандардың бірі болып табылады. Ол 4235 сейсмометрден тұрып, ескертулерді екі деңгейде таратады: халыққа (интенсивтілік ≥ 5) және техникалық қызметтерге ($M \geq 3,5$ немесе ≥ 3 балл) [6]. Жүйенің ерекшелігі – критикалық инфрақұрылымның толық автоматтандырылуы: J-Alert сигналдары спутниктік және жерүсті арналар арқылы 2 секунд ішінде 26 «Синкансэн» пойыздарын тоқтатып, лифтер мен өндірістік жүйелерді ажыратуға мүмкіндік береді. 2011 жылғы Ұлы Шығыс Жапония жер сілкінісі кезінде Токио қаласы S-толқынның соққысына дейін 60 секунд бұрын ескерту алды [6].

АҚШ-та ShakeAlert жүйесі Батыс жағалауды (Калифорния, Орегон, Вашингтон) қамтып, ANSS инфрақұрылымын пайдаланады. Қазіргі желі 1675 станцияның 1115-ін қамтиды (жоспардың 67%) [4]. Хаттамалар сенсорларды орналастыруға қатаң талаптар қояды: қалалық аймақтарда 10 км, сейсмикалық белсенді аймақтарда 20 км және сирек қоныстанған жерлерде 40 км арақашықтық. Ескертулер $M \geq 3,5$ оқиғаларға (техникалық) және $M \geq 5,0$ оқиғаларға (WEA арқылы жалпы халыққа) беріледі.

Тынық мұхиты плитасының Мехико қаласынан қашық орналасқан субдукция аймақтары 60-80 секундтық алдын ала ескерту уақытын қамтамасыз етеді. Желі 97 датчик арқылы 12000-нан астам муниципалды дауыс күшейткіштер мен VHF-радиостанцияларға хабарлама таратады [5].

Түркияда IERREWS/AFAD жүйесі газ желілерін автоматты түрде өшіруге бағытталған. 2023 жылғы жер сілкінісін ретроспективтік талдау көрсеткендей, IV интенсивтілік шегінде ескерту, жер сілкінісі басталғаннан кейін 10-20 секунд ішінде берілсе, 95% тиім-

ді алдын ала ескертуге мүмкіндік береді, ал алдын ала ескерту уақыты 10-60 секунд аралығында болады [5, 8].

Алгоритмдердің технологиялық эволюциясы жасанды интеллект пен күрделі ақау модельдерін енгізу арқылы дамуда. Қазіргі жүйелер нүктелік көз модельдерінен күрделі алгоритмдерге көшуде. АҚШ-та EPIC (нүктелік көз) және FinDer (сызықты үзілу моделін), ал Жапонияда PLUM (Propagation of Local Undamped Motion) әдісі қолданылады, ол жер қозғалысын тікелей тіркеуге негізделіп, эпицентр параметрлеріне тәуелділікті азайтады және ірі оқиғаларда магнитуда қателігін төмендетеді [4].

$M > 7$ магнитудалы жер сілкіністерінде дәстүрлі сейсмометрлер шамадан тыс көрсеткіш беруі мүмкін. ShakeAlert жүйесіне енгізілген G-FAST алгоритмі GPS деректерін пайдаланып жер қыртысының тұрақты ығысуын нақты уақытта өлшейді, бұл үзілу масштабы мен магнитуданы дәлірек анықтауға мүмкіндік береді [4]. Жер сілкінісін анықтау жылдамдығынан бөлек, ерте ескерту жүйесінің тиімділігін анықтайтын негізгі фактор – ескерту сигналын соңғы пайдаланушыға жеткізу уақыты. Ол қауіпсіздік шараларын қабылдау үшін берілетін уақытты тікелей айқындайды. Халықаралық тәжірибе бойынша жүйе тиімділігі датчик саны мен болжау дәлдігінен бөлек, хабар жеткізу арналарының архитектурасына да тәуелді.

АҚШ-тағы сейсмикалық ескерту жүйесі ұялы желілерді жүктемей хабарлама таратады, алайда теориялық кешігу бірнеше секундқа дейін жетуі мүмкін [4]. АҚШ-тағы MyShake қосымшасы машиналық оқытуды пайдаланып сейсмикалық сигналдарды сүзгіден өткізеді және 10000 қолданушыға бір секундтан аз уақытта ескерту жеткізе алады. Жапонияда Yurikuru қосымшасы 5 млн-нан астам жүктемеге ие, премиум жазылушыларға ескертуді кепілдендіреді [6].

Мексика мен Түркия тәжірибесі физикалық хабарландыру құралдарының (сиреналар, мешіттердегі дауыс жүйелері) жоғары тиімді екенін көрсетеді. Олар мобильді интернет жоқ жағдайда да халыққа жедел ескерту жасауға мүмкіндік береді [5, 8].

Ерте ескерту жүйесінің тиімділігі сигналды соңғы пайдаланушыға жеткізу жылдамдығы мен арналардың сенімділігіне тәуелді. Сондықтан жүйені жобалауда тек датчик желісін кеңейту емес, тиімді хабар тарату арналарының интеграциясы да маңызды.

Халықаралық тәжірибе мен ғылыми зерттеулер негізінде ерте ескерту жүйелерін анықтау тәсілі, болжау әдістемесі, ақпарат жеткізу арналары және автоматтандыру деңгейі бойынша жіктеуге болады.

Аналитикалық айқындықты арттыру

және салыстырмалы талдаудың жүйелілігін қамтамасыз ету мақсатында көпкритерийлі интеграциялық әдістеме ұсынылады. Бұл әдістеме сейсмикалық ерте ескерту жүйелерінің тиімділігін бағалау барысында төрт негізгі критерийді біртұтас кешенде қарастыруға негізделген. Атап айтқанда, анықтау жылдамдығы, болжау дәлдігі, халықты қамту деңгейі және автоматтандыру дәрежесі өзара байланыста талданады.

Ұсынылып отырған әдістеменің құрылымы келесі кезеңдерді қамтиды:

1-кезең. Қолданыстағы сейсмикалық ерте ескерту жүйелері бойынша бастапқы деректерді жинау, оның ішінде, желілік құрылым, қолданылатын өңдеу алгоритмдері және ескерту хабарламаларын жеткізу арналары.

2-кезең. Жиналған деректерді анықтау жылдамдығы, болжау дәлдігі, халықты қамту ауқымы және автоматтандыру деңгейі бойынша жіктеу.

3-кезең. Сейсмикалық апаттардың ықтимал сценарийлерін ескере отырып, әрбір критерийдің салыстырмалы маңыздылығына сәйкес салмақ коэффициенттерін тағайындау.

4-кезең. Сейсмикалық апат сценарийлері аясында алынған нәтижелер негізінде жүйелердің кешенді салыстырмалы тиімділігін анықтау.

Ұсынылған интеграциялық әдістеме сейсмикалық ерте ескерту жүйелерін объективті салыстыруға, олардың функционалдық ерекшеліктерін анықтауға және практикалық қолдану тұрғысынан негізделген қорытындылар жасауға мүмкіндік береді.

Халықаралық тәжірибеге, ресми дерек-

терге және ретроспективті талдауға сүйеніп отырып, ерте ескерту жүйелерін негізгі сипаттамалар бойынша салыстыру кестесі ұсынылған:

Қорытынды

Қазақстан Республикасының сейсмикалық қауіпсіздігі контекстінде жүргізілген зерттеу ерте ескерту жүйелерін ұлттық практикаға енгізудің өзектілігін көрсетеді. Оңтүстік және шығыс өңірлердің сейсмикалық қауіптілігін ескере отырып, халық пен инфрақұрылымды қорғауда автоматтандырылған ерте ескерту жүйесін дамыту басым бағыт ретінде айқындалады.

Жер сілкіністері туралы ерте ескерту жүйелерін халықаралық талдау олардың архитектуралық құрылымы, алгоритмдік дамуы және тиімділігінің негізгі заңдылықтарын айқындады. Қазіргі жүйелер жергілікті, өңірлік және гибриді тәсілдерге негізделетіні анықталды. Олар анықтау жылдамдығы, ошақ параметрлерін бағалау дәлдігі және қамту деңгейі арасындағы теңгеріммен сипатталады. Практикалық тұрғыдан ең перспективті – жеделдік пен сенімділікті үйлестіретін гибриді архитектуралар.

Ерте ескерту жүйелері нүктелік модельдерден геодезиялық деректерді біріктіретін күрделі алгоритмдерге өтті. Сейсмикалық деректерді интеграциялау дәлдікті арттырып, ескерту уақытын қысқартады, ал жасанды интеллект өңдеуді автоматтандырып, магнитуда бағалау қателігін азайтады.

Ерте ескерту жүйелері төрт критерий бойынша жіктелді: детекция түрі, болжау әдістемесі, сигнал жеткізу тәсілі және автоматтандыру деңгейі. Осы негізде тиімділікті бағалауға арналған көпкритерийлі интегра-

EEW жүйелерін негізгі сипаттамалар бойынша салыстыру

Ел / Жүйе	Анықтау тәсілі	Сейсмикалық әсерді болжау тәсілі	Ескерту сигналдарын тарату арналары	Орташа ескерту уақыты
Қазақстан / АЕЕЖ	P-толқын детекциясы (локалды)	Сейсмикалық ошақ параметрлеріне негізделген	Cell Broadcast (Mass Alert), «Darmen» қосымшасы	10-40 с
Жапония / JMA	Желілік	Сейсмикалық толқын өрісіне негізделген (PLUM)	WEA, мобильді қосымшалар, сиреналар	60 с
АҚШ / ShakeAlert	Желілік	Сейсмикалық ошақ параметрлеріне негізделген (EPIC, FinDer)	WEA, MyShake қосымшасы	10-40 с
Мексика / SASMEX	Ошағы бойынша	Сейсмикалық ошақ параметрлеріне негізделген	Сиреналар, радио, VHF арналары	60-80 с
Түркия / AFAD IERREWS	Гибриді	Сейсмикалық ошақ параметрлеріне, толқын өрісіне негізделген	Мешіттердің дауыс хабарландырулары, WEA	10-60 с

циялық әдістеме әзірленді, ол салыстырмалы талдау мен ұлттық сейсмикалық жүйелерді жобалауда қолданылады.

Алынған нәтижелер Қазақстан Республикасы үшін практикалық маңызға ие және 2024-2028 жылдарға арналған сейсмологиялық саланы дамыту жөніндегі кешенді жоспарды іске асыру барысында пайдаланылуы мүмкін. Жұмыста ұсынылған ғылыми тәсілдер мен әдістемелік шешімдер сейсмикалық тәуекелдерді төмендетуге және жойқын табиғи апаттардың салдарын азайтуға бағыт-

талған тиімді ұлттық ерте ескерту жүйесін қалыптастыруға ықпал етеді.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу өңірлік геофизикалық және демографиялық ерекшеліктерге бейімделген жоғары технологиялық гибриді ерте ескерту жүйелерін енгізудің орындылығын растайды. Алынған қорытындылар ғылыми жаңалық пен практикалық маңызға ие болып, әрі қарайғы зерттеулер мен елдің сейсмикалық қауіпсіздігін арттыру стратегияларын әзірлеуге негіз бола алады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Об утверждении Комплексного плана развития сейсмологической отрасли Республики Казахстан на 2024-2028 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 2 июля 2024 года № 526. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000526>.
2. Соколов Ю.И. Опыт Японии в преодолении последствий стихийных бедствий // Проблемы анализа риска. 2018. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-yaponii-v-preodolenii-posledstviy-stihiynyh-bedstviy> (дата обращения: 04.02.2026).
3. Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD). National Earthquake Strategy and Action Plan. Ankara, Turkey: AFAD, 2012. 73 pp. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/udsep_010915_kitapENG.pdf.
4. Given D. D., Allen R. M., Baltay A. S., Bodin P., Cochran E. S., Creager K., de Groot R. M., Gee L. S., Hauksson E., Heaton T. H., Hellweg M., Murray J. R., Thomas V. I., Toomey D., and Yelin T. S. Revised Technical Implementation Plan for the ShakeAlert System – An Earthquake Early Warning System for the West Coast of the United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1155, 2018. 42 pp. <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1155/ofr20181155.pdf>.
5. Eren M. Development of Earthquake Early Warning Systems in Marmara Region: A Hybrid Model Utilizing Mosque Loudspeakers. International Journal of Environment and Geoinformatics, 2025, 12(1), pp. 61-71. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4605989>.
6. Japan Meteorological Agency (JMA). Earthquake Early Warning (EEW) Leaflet. Japan Meteorological Agency. <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/EEWLeaflet.pdf>.
7. Wang, Y., Wang, Z., Cao, Z., and Lan, J., Deep Learning for Magnitude Prediction in Earthquake Early Warning, arXiv:1912.05531, 2019, <https://arxiv.org/pdf/1912.05531>.
8. Rea R., Colombelli S., Elia L., and Zollo A. Retrospective Performance Analysis of a Ground Shaking Early Warning System for the 2023 Turkey-Syria Earthquake. Communications Earth & Environment, 2024, 5:1. <https://www.iris.unina.it/retrieve/9adace69-9324-4325-b83c-35bb6026f502/s43247-024-01507-3-3.pdf>.
9. Нурмагамбетов А., Данабаева А. Т., Досымбекова Ж. Б. Сейсмологические аспекты организации автоматизированной системы раннего оповещения в городе Алматы // Азаматтық қорғаудың хабаршысы. 2024. № 3 (55). 6-12 бб. URL: https://agz.edu.kz/public/uploads/2024/NachZh_55/3_55_ot_10.10_6_12.pdf.
10. Кусаинов А.Б., Кучкин В.В. Обзор СРО Центральной Азии: информационно-аналитический документ по созданию Региональной системы раннего оповещения и взаимного информирования о чрезвычайных ситуациях. Almaty: CESDRR, 2024. 1 p. https://cesdrr.org/uploads/docs/2025/24.11.2024_%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80_%D0%A1%D0%A0%D0%9E_%D0%A6%D0%90.pdf.

Анализ и сравнительная оценка систем раннего оповещения о землетрясениях: международный опыт и технологические подходы

МАРАТОВА Карина Арманқызы, магистрант, ka.maratova@au.kz,
<https://orcid.org/0009-0007-1048-5784>,

Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан.

Аннотация. Рассматриваются международный опыт и современные технологические решения в области систем раннего оповещения о землетрясениях. Целью исследования является сравнительная оценка принципов функционирования, архитектурной структуры и практической эффективности систем раннего оповещения, внедрённых в различных странах, с учётом развития сейсмической безопасности Республики Казахстан. В работе проанализированы локальные, региональные и гибридные системы, применяемые в Японии, США, Мексике и Турции, а также современные алгоритмы обработки сейсмических данных и каналы передачи предупреждений. Рассмотрены текущее состояние и направления развития автоматизированной системы раннего оповещения в Казахстане. На основе проведённого анализа предложена авторская четырёхэтапная методика многокритериальной сравнительной оценки систем раннего оповещения. Установлено, что эффективность таких систем определяется плотностью сети сейсмических наблюдений, скоростью обработки информации, точностью прогнозирования и надёжностью механизмов оповещения. Полученные результаты имеют теоретическую и практическую значимость для совершенствования национальной системы сейсмического мониторинга и повышения уровня сейсмической безопасности.

Ключевые слова: землетрясение, системы раннего оповещения, сейсмический мониторинг, сейсмический риск, международный опыт, гибридные системы, сейсмические алгоритмы, волны P и S, сигналы оповещения, каналы передачи информации, критическая инфраструктура, снижение риска.

Analysis and Comparative Assessment of Earthquake Early Warning Systems: International Experience and Technological Approaches

MARATOVA Karina, Master's Student, ka.maratova@au.kz,
<https://orcid.org/0009-0007-1048-5784>,

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan.

Abstract. International experience and modern technological solutions in the field of earthquake early warning systems are examined. The aim of the study is to conduct a comparative assessment of the operating principles, architectural structures, and practical effectiveness of early warning systems implemented in various countries, as well as to analyze the development of seismic safety in the Republic of Kazakhstan. The paper analyzes local, regional, and hybrid systems used in Japan, the United States, Mexico, and Turkey, along with modern algorithms for processing seismic data and warning information delivery channels. It also considers the current state and development prospects of the automated earthquake early warning system in Kazakhstan. Based on the conducted analysis, an original four-stage methodology for the multicriteria comparative assessment of early warning systems is proposed. The study establishes that the effectiveness of such systems depends on the density of seismic monitoring networks, data processing speed, forecasting accuracy, and the reliability of alert dissemination mechanisms. The obtained results provide theoretical and practical value for improving the national seismic monitoring system and enhancing seismic safety.

Keywords: earthquake, earthquake early warning systems, seismic monitoring, seismic risk, international experience, hybrid systems, seismic algorithms, P and S waves, warning signals, information delivery channels, critical infrastructure, risk reduction.

REFERENCES

1. Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana «Seismicheskaya bezopasnost' v Respublike Kazakhstan» na 2024-2028 gody: Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 21 iyunya 2024 goda No. 526. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000526>.
2. Sokolov Yu.I. Opyt Yaponii v preodolenii posledstviy stikhiinykh bedstvii. Problemy analiza riska. 2018, no. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-yaponii-v-preodolenii-posledstviy-stihiinykh-bedstviy> (accessed: 04.02.2026).
3. Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD). National Earthquake Strategy and Action Plan. Ankara, Turkey: Publ. AFAD, 2012. 73 p. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/udsep_010915_kitapENG.pdf.
4. Given D.D., Allen R.M., Baltay A.S., Bodin P., Cochran E.S., Creager K., de Groot R.M., Gee L.S., Hauksson E., Heaton T.H., Hellweg M., Murray J.R., Thomas V.I., Toomey D., and Yelin T.S. Revised Technical Implementation Plan for the ShakeAlert System – An Earthquake Early Warning System for the West Coast of the United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1155, 2018. 42 p. <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1155/ofr20181155.pdf>.
5. Eren M. Development of Earthquake Early Warning Systems in Marmara Region: A Hybrid Model Utilizing Mosque Loudspeakers. International Journal of Environment and Geoinformatics, 2025, vol. 12, no. 1, pp. 61-71. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4605989>.
6. Japan Meteorological Agency (JMA). Earthquake Early Warning (EEW) Leaflet. Tokyo: Publ. Japan Meteorological Agency. <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/EEWLeaflet.pdf>.
7. Wang Y., Wang Z., Cao Z., and Lan J. Deep Learning for Magnitude Prediction in Earthquake Early Warning. arXiv:1912.05531, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1912.05531>.
8. Rea R., Colombelli S., Elia L., and Zollo A. Retrospective Performance Analysis of a Ground Shaking Early Warning System for the 2023 Turkey-Syria Earthquake. Communications Earth & Environment, 2024, vol. 5, no. 1. <https://www.iris.unina.it/retrieve/9adace69-9324-4325-b83c-35bb6026f502/s43247-024-01507-3-3.pdf>.
9. Nurmagambetov A., Danabaeva A.T., Dosymbekova Zh.B. Seismologicheskie aspekty organizatsii avtomatizirovannoi sistemy rannego opoveshcheniya v gorode Almaty. Azamattyk korgaudyn khabarshysy. 2024, no. 3 (55), pp. 6-12. Available at: https://agz.edu.kz/public/uploads/2024/NachZh_55/3_55_.ot_10.10_6_12.pdf.
10. Kusainov A.B., Kuchkin V.V. Obzor SRO Tsentralnoi Azii: informatsionno-analiticheskii dokument po sozdaniyu Regionalnoi sistemy rannego opoveshcheniya i vzaimnogo informirovaniya o chrezvychainykh situatsiyakh. Almaty: Publ. CESDRR, 2024. 1 p. https://cesdrr.org/uploads/docs/2025/24.11.2024_%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80_%D0%A1%D0%A0%D0%9E_%D0%A6%D0%90.pdf.