

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті

ӘОЖ 631.459.43

Қолжазба құқығында

АБДУЛЛАЕВА ӘСЕЛ СӘБИТҚЫЗЫ

**Мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде Іле Алатауы өзендер
алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау және зоналау**

8D05203 – Гидрология

Философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған
диссертация

Отандық ғылыми жетекші:
география ғылымдарының кандидаты,
аға оқытушы Мусина Айнур Каировна

Шетелдік ғылыми жетекші:
PhD, Барандун Мартина,
Фрибург университеті, Швейцария

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2024

МАЗМҰНЫ

АНЫҚТАМАЛАР.....	4
ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН БЕЛГІЛЕР.....	5
КІРІСПЕ.....	8
1 МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕР: НЕГІЗГІ ТҮСІНІКТЕР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ТӘЖІРИБЕСІ.....	14
1.1 Негізгі түсініктер.....	14
1.2 Мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудің әлемдік тәжірибелері.....	17
1.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің зерттелуі және физикалық-географиялық қалыптасу жағдайлары.....	20
ҚОРЫТЫНДЫ.....	25
2 МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ.....	26
2.1 Далалық зерттеу әдістері.....	26
2.2 Жерді қашықтықтан зондтау және ГАЗ технологиялары.....	32
2.3 Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуын гидродинамикалық модельдеу.....	35
ҚОРЫТЫНДЫ.....	40
3 МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ СИПАТТАМАЛАРЫ...41	
3.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары.....	41
3.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің жаға динамикасы, көл қазаншұқырларының дамуы.....	52
3.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы және даму динамикасы.....	64
ҚОРЫТЫНДЫ.....	72
4 ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ОРТАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ МҮМКІН БОЛАТЫН АҚТАРЫЛУ ҚАУІПТІЛІГІН БАҒАЛАУ.....	73
4.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторлар.....	73
4.1.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші климаттық факторлар.....	73
4.1.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші жамылғы беттік факторлар.....	77
4.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің мүмкін болатын ақтарылу қауіптілігі критерийлері.....	82
4.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін алдын-алуға бағытталған жұмыстар.....	86
ҚОРЫТЫНДЫ.....	93

5 ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ОРТАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ ӨЗЕН АЛАПТАРЫНЫҢ СЕЛ ҚАУІПТІЛІГІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ЗОНАЛАУ.....	94
5.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі сел қауіптілігін тудыратын және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтаудағы критерийлерді бағалау.....	94
5.1.1 Сел қауіптілігіне әсер етуші факторларды талдау негізінде айқындалған критерийлер.....	98
5.1.2 Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау критерийлері.....	104
5.1.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі сел қауіптілігін тудыратын және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтаудағы критерийлерді бағалау әдісі.....	106
5.2 Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде қалыптасатын сел тасқындарын модельдеу және потенциалды қауіптілікті зоналау.....	121
ҚОРЫТЫНДЫ.....	130
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....	131

АНЫҚТАМАЛАР

Алдын алу шаралары - сел тасқындарының пайда болу қаупін азайту арқылы туындаған жағдайды жеңілдетуге бағытталған ұзақ мерзімді шаралар кешені.

Аналитикалық иерархиялық процесс – кешенді шешім қабылдаудың құрылымданған техникасы. Диссертациялық жұмыста зерттеліп отырған аудандағы сел тасқынына ұшырайтын аумақтар және сел тасқыны қауіптілігін анықтау барысында, әрбір критерийдің әсер ету үлес салмағын анықтау үшін қолданылды.

Аэрофотосуреттер - жергілікті жерді зерттеу үшін және онда жүріп-тұруды жоспарлау үшін жер бетін ұшақтан немесе басқа ұшу аппараттарынан суретке түсіру арқылы алынған фотосуреттер. Ұшақтан жер бетін суретке түсіру процесі аэрофототүсірілім немесе әуе фотосуреті деп аталады.

Вельмидің үйкеліс заңы - қатты фазаның кедергісін (μ кейде ішкі ығысу бұрышының тангенсі ретінде көрсетіледі) және тұтқыр немесе турбулентті сұйықтық фазасын (ξ гидродинамикалық аргументтерді пайдалана отырып Вельми енгізген) ескере отырып, ағынның қозғалыс жолындағы әрекетіне жауап береді.

Географиялық ақпараттық жүйелер (ГАЖ) - кеңістіктік және олармен байланысты кеңістіктік емес мәліметтерді жинау, сақтау, өңдеу, талдау мен кескіндеуді және олардың негізіндегі географиялық кеңістік жайлы ақпарат пен білімді қамтитын ақпараттық жүйе.

Ғарыштық суреттер - электромагниттік спектрдің әртүрлі диапазондарында ғарыш аппараттары (ҒА) арқылы қол жеткізіліп, белгілі бір алгоритм бойынша визуализацияланатын мәліметтердің жиынтық атауы.

Далалық зерттеу мәліметтері - табиғи объектілердің нивелирмен, теодолитпен, электронды тахеометрмен, GPS қабылдағыштармен жүргізілген геодезиялық өлшеулері, кадастрлық түсірілімдері, инженерлік-геодезиялық ізденістер, топографиялық, сонымен қатар аумақты геоботаникалық және басқа да әдістерді қолдану, зерттеу нәтижесінде алынатын мәлімет көздері.

Жер бедерінің сандық моделі - бастапқы мәліметтерді (X, Y, Z координаттық нүктелер жиыны) көрсетудің қандай да бір формасы мен жер бетін бастапқы мәліметтердің интерполяциясы немесе аппроксимациясы арқылы қалпына келтіруге мүмкіндік беретін олардың құрылымдық сипатталу тәсілін талап ететін жер бетінің ойлы-қырлылығын сандық тұрғыдан көрсету құралы.

Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері - жер бетін әр түрлі түсіруші құрал-жабдықтармен жабдықталған әуелік және ғарыштық құрылғылармен бақылау нәтижесінде алынатын мәліметтер жиынтығы.

Эвакуациялық канал арқылы көлді босату әдісі - сел қауіптілігін төмендетуге ашық канал-траншеялар есебінен көл қазаншұңқырының толысу деңгейін төмендету үшін көлдердің байламдарында есептік профильдегі және кимадағы эвакуациялық траншеялар салу арқылы су жіберу әдісі.

Карта - түрлі координаттық жүйелерден, проекциялардан, символдар жиынынан, қарапайымдау және үйлестіру әдістерінен тұратын кеңістіктік мәліметтерді бейнелеудің графиктік формасы.

Карта масштабы - картадағы қандай да бір сегменттің ұзындығын жер бетіндегі сол аралықты қамтитын сегменттің ұзындығына қатынасы ретінде өрнектеуге болатын картадағы объектілердің кішірею дәрежесін көрсету үшін жиі қолданылатын термин.

Кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі - әрбір пиксельде бейнеленген беттің ауданын сипаттайтын ұғым. Егер жергілікті жерде пиксельдің бір жағының ұзындығы 100 м құраса, онда растрдың геометриялық кескінделу мүмкіндігі 100 м тең деп қабылданады. Пиксель қабырғасының ұзындығы жергілікті жердегі 2 м сәйкес келсе, онда оның кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 2 м құрайды.

Карлы көлдер - карлы мұздық әрекетінің нәтижесінде қалыптасқан цирк түбінің мореналық шөгінділеріндегі ойыстарды толтырып тұратын су қоймалары.

Мәліметтер базасы - бір-бірімен байланысты файлдардың ұйымдастырылған жиынтығы.

Бөгелмелі көлдер - негізгі алқапта және кейбір жеке ағынсуларда орналасқан моренаның қиылысқан жерлерінде пайда болған су қоймалары.

Мұздықтық-мореналық көлдер - биік таулы және тауалды аудандарының қолайлы физикалық-географиялық жағдайларына байланысты қалыптасатын табиғи су қоймалары.

Мұздықтық-мореналық көлдердің дамуы - су бетінің ауданы мен тереңдігінің және жаға динамикасының белгілі бір уақыт ішінде қарқынды өсуі, өзгеруі.

Мұздықтық-мореналық көлдердің сарқылуы - белгілі бір уақыт ішінде көл қазаншұңқырының деградацияға ұшырауы, көлдің тым аз уақытта өз көлемін жоғалтуы немесе көлдің ақтарылуы.

Мұздықтық-мореналық көлдердің консервативті күйі - су көлемінің көпжылдық орташа мәндерінен ауытқуларының байқалмауы.

Мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуы - ағынды каналының немесе морена, мұздық денесінің өзгеріске ұшырауы әсерінен қазаншұңқырдың бастапқы толысуы.

Ойпаңды көлдер - мұздықтың ашық бөлігі мен моренаның фронталды жотасы арасындағы морена бетіндегі жабық шұңқырлардың сумен толысуынан пайда болатын су қоймалары.

Сел қаупі - селдің жүріп өтуі нәтижесінде туындайтын экономикалық шығындар мен адам шығынының күтілетін сандық мөлшері.

Сел қауіптілігі (hazard) - зиян келтіруі мүмкін құбылыстардың, оқиғалардың, процестердің көрініс беру мүмкіндігі.

Сифондар әдісі - мореналық көлден суды айдап шығаруға арналған әдіс, оның өнімділігі көл қазаншұңқырына ағып келетін су көлемінен асып кетуі керек.

Статистикалық мәліметтер - ақпаратты сандық түрде көрсету нәтижесінде халық шаруашылығындағы әр түрлі саладағы мемлекеттік қызметтердің мәліметтеріне, сонымен қатар стационарлы бақылау бекеттерінің мәліметтеріне (гидрологиялық және метеорологиялық мәліметтер, қоршаған ортаның ластануы мәліметтеріне) қол жеткізу.

Су индексі (NDWI) – су объектілерін белгілеп көрсететін, сонымен бірге өсімдіктер мен топырақтың басқа да ерекшеліктерін тежейтін жасыл және жақын инфрақызыл спектрлік жолақтар арасындағы қатынастардың қалыпқа келтірілген индексі.

Термокарстты көлдер - термокарст процестері және көмілген мұздықтың жарылу деформациясы нәтижесінде жарықтарды, ойықтарды, термокарст шұңқырларының еріген сумен толысуынан пайда болатын су қоймалары.

Ұшырау мүмкіндігі (susceptibility) - кез келген материалдық объектінің белгілі бір генезистегі, қарқындылықтағы апатты құбылыстың жүріп өту нәтижесінде табиғи немесе белгіленген функцияларын орындау қабілетін ішінара немесе толық жоғалту қасиеті ретінде анықталады.

RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) – үш өлшемді рельефтегі геофизикалық массалық қозғалыстардың (қар көшкіні, сел тасқыны, жылжыма, сырғыма) қалыптасуынан бастап, жүріп өтуіне дейінгі қозғалысын есептеуге арналған заманауи сандық модель.

ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН БЕЛГІЛЕР

AHP – Analytic Hierarchy Process
API - Application Programming Interface
CHELSA – Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas
LULC – Land cover and Land use
MSS – Multispectral Scanner System
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NDWI - Normalized difference water index
NIR – Near-infrared
OSM – Open Street Map
RAMMS – Rapid Mass Movements Simulation
SPI – Stream power index
STI – Sediment transport index
SWIR - Short Wavelength Infrared
TM – Thematic Mapper
TM/ETM+ - Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus
TWI - Topographic wetness index
USGS – The United States Geological Survey
ГАЗ – географиялық ақпараттық жүйелер
ЖБСМ – Жер бедерінің сандық моделі
ЖҚЗМ – Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері
АҚ – Акционерлік қоғам
РМК – Республикалық мемлекеттік кәсіпорын
ММ – Мемлекеттік мекеме
ТЖМ – Төтенше жағдайлар министрлігі

КІРІСПЕ

Жұмыстың жалпы сипаттамасы Сел тасқындары Қазақстанның шығыс, оңтүстік-шығыс және оңтүстік бөлігіндегі таулы аудандарда көрініс беретін қауіпті құбылыстардың бірі. Сел тасқындары қауіптілігінің дәлелі ретінде оның аталған аудандарға әкелетін зиянды салдарын келтіруге болады. Қазақстанның сел құбылыстары Антологиясында келтірілген мәліметтерге сүйенсек, сел тасқындары кезінде шаруашылық объектілерге нұқсан келетіндігі, тіпті адам өлімі де орын алатын жағдайлардың тіркелгендігі жөніндегі мәліметтерді кездестіруге болады. Оған қоса, еліміздегі сел қалыптасу және оның әсер ету аймақтары шамамен 164 мың км² құрайтындығы, оның ішінде Алматы облысына тиесілі сел қауіпті ауданның 11 мың км² алып жатқандығы, адамның тіршілік етуі мен шаруашылық жүргізуіне қолайлы жерлердің сел қауіптілік дәрежесін арттыра түседі.

Климаттың өзгеруі жағдайында мұздықтардың кейін шегінуі нәтижесінде биік таулы аудандардағы жаңа мореналардың босап шығуы, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы және олардың қарқынды дамуы, көл байламының тұрақсыздығы зерттеу ауданындағы гляциалды сел қауіптілігін арттыруда. Оның үстіне, климаттың ғаламдық жылынуы негізінде биік таулы аймақтағы нөлдік изотерманың жоғарылауы есебінен нөсерлі генезистегі сел тасқындарының бос сынықты материалдардың мол қоры жинақталған аумақтарда көрініс беру ықтималдығы нөсерлі селдердің қауіптілігін еселей түсуде. Осылайша, Іле Алатауының орталық бөлігіндегі елді-мекендер, шаруашылық объектілер мен инфрақұрылым түрлері потенциалды қауіп аймағының тікелей рецепиенттеріне айналды.

Сол себепті, таулы және тауалды аудандардың қарқынды игеріліп, адамның шаруашылық іс-әрекетінің әсер ету қарқыны мен ареалының артуына байланысты, сондай-ақ селден қорғану мақсатына салынған имараттардың тозуына немесе болашақта күтілетін сел тасқындарына төтеп бере алмайды деген қауіптердің болуына байланысты сел қауіптілігі, сел тасқындарына ұшырайтын аудандар және сел қауіп жөніндегі ұғымдарды саралап, солардың негізінде қарастыралатын аудан картасының жаңа нұсқаларын жасау қажеттілігі туындады.

Қазіргі таңда, потенциалды сел қауіптілігін бағалау мақсатында географиялық ақпараттық жүйелер (ГАЗ) технологияларының, Жерді қашықтықтан зондау мәліметтерінің (ЖҚЗМ) жылдам, әрі уақытылы шешім қабылдау мақсатында пайдаланылу аясы артуда. Нақтылай келе, сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалау арқылы зерттеу ауданын қауіптілік дәрежесі бойынша зоналау нәтижелері аумақтағы сел қауіпін басқару шешімдерін қабылдау кезінде және сел қауіпін ұшырауы мүмкін болатын аумақтарды болжау кезінде қажет. Сондай-ақ, қол жеткізілген нәтижелер сел қауіпті аумақта жүзеге асырылуы қажет шаралар мен салынуы мүмкін болатын қорғаныс имараттарын жобалау және жоспарлау кезінде оңтайлы, әрі ұтымды шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретіндігі сөзсіз. Ал,

ол өз кезегінде халықты сел тасқындарының апатты әсерінен аман алып қалу мақсатында жүзеге асырылатын қорғану және алдын алу жұмыстарының дұрыс, әрі уақытылы жүзеге асуының негізі болып табылады.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Қоңыржай ендіктерде XX ғасырдың екінші жартысынан басталған климаттың ғаламдық жылынуы биік таулы аймақтардағы мұздықтардың кейін шегінуіне алып келді. Мұздықтардың кейін шегінуі нәтижесінде биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық кешеннің табиғаты өзгерді. Солардың ішінде биік таулы аймақтағы мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болып, олардың өсуіне, дамуына жағдай жасалды. Іле Алатауы аймақтарында да аталған жағдайлар байқалып отыр. Іле Алатауында 60-шы жылдардың екінші жартысынан бастап бірнеше мұздықтық-мореналық көлдер пайда болды. Қазіргі кезде осы мореналық көлдер толысып, олардағы су деңгейі көтерілуде. Ол өз кезегінде, мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін арттырып, аумаққа потенциалды қауіп төндіреді. Сондықтан мореналық көлдердің деңгейінің артып, дамуы нәтижесінде пайда болатын гляциалды сел тасқындары қауіптілігін бағалау, сонымен қатар сел тасқындарының жүріп өту аумағын жаңа мәліметтер мен оларды өңдеудің жаңа технологияларын қолдану арқылы зоналау өзекті мәселе болып табылады.

Жұмыстың мақсаты мен міндеттері

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – Іле Алатауы өзендер алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде пайда болатын тасқындарды гидродинамикалық модельдеу, сонымен қатар мұздықтық-мореналық көлдердегі потенциалды қауіптілікті бағалау және сел қауіпті аудандарды зоналау.

Алға қойылған мақсатқа байланысты диссертациялық жұмысқа келесі міндеттер жүктелді:

- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық және гидрологиялық сипаттамаларын нақтылау;
- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің даму динамикасына баға беру;
- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуына әсер ететін факторларды және ақтарылу критерийлерін анықтау;
- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарушылық қаупін анықтау негізінде олардың қазіргі жағдайына баға беру;
- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қаупін алдын-алуға бағытталған жұмыстарға баға беру;

- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде қалыптасатын сел тасқындарын модельдеу және олардың жүріп өту жолындағы қауіптілік дәрежесі мен қауіп деңгейін анықтау;

- Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде өзен алаптарындағы потенциалды қауіпті бағалау және зоналау.

Зерттеу объектісі: Іле Алатауы солтүстік беткейінің орталық бөлігінде орналасқан Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары

Зерттеу пәні: мұздықтық-мореналық көлдердің жіктемесі, олардың уақыт және кеңістік бойынша өзгеру динамикасы, мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу кезіндегі өзен алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау және зоналау

Зерттеу әдістері: мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы нәтижесінде пайда болатын өзен алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау және зоналау үшін Жер туралы ғылым салаларында қолданылатын үйлескен әдістер кешенін және мамандандырылған әдістерді қолдану қажеттілігі туындады. Олардың ішінен жүйелік талдау, синтездеу, картографиялық, салыстырмалы талдау, логикалық үлгілеу және т.б. әдістерді атауға болады. Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық көлдердің уақыт және кеңістік бойынша өзгеру динамикасын талдау үшін статистикалық әдістер мен ГАЖ және қашықтықтан зондтау технологиялары қолданылды. Ал, өзен алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау және зоналау ГАЖ ортасында шешім қабылдаудың көп критериялық әдісі арқылы жүзеге асырылды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы

➤ Мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен даму динамикасын бағалау мақсатында су индексі (NDWI) арқылы зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдер саны нақтыланып, олар су айдынының ауданы бойынша жіктеліп, биіктік бойынша таралу динамикасы анықталды;

➤ Ғарыштық суреттерін өңдеу негізінде мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларына қол жеткізіліп, мұздықтық-мореналық көлдердің жаңа кеңістіктік-уақыттық таралу картасы (1:25 000) жасалды;

➤ Сел тасқынының қалыптасуына, дамуына, жүріп өтуіне әсер ететін гидрометеорологиялық, геоморфологиялық, геоботаникалық факторлар бағаланып, сел тасқынының қауіптілігіне және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарға әсер етуші негізгі критерийлер анықталды;

➤ Табиғи ортаның қазіргі өзгерістерін сипаттайтын көрсеткіштерді ГАЖ ортасында өңдеу арқылы мультикритериялық шешім қабылдау әдісі көмегімен Іле Алатауының орталық бөлігіндегі сел алаптарының 1:25 000 масштабындағы сел қауіптілік картасы жаңартылды;

➤ Алғашқы рет Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы сел тасқынына ұшырауы мүмкін объектілер жөніндегі мәліметтерді ескеру негізінде Іле Алатауының орталық бөлігінің сел тасқынына ұшырау картасы жасалды;

➤ Алғашқы рет Іле Алатауының орталық бөлігінде орналасқан аса қауіпті мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы RAMMS (RAPID Mass Movements Simulation) – геофизикалық массалық қозғалыстарды есептеуге арналған заманауи сандық моделі арқылы модельденіп, сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасының дәлділігі арттырылып, сел тасқынының жүріп өту жолындағы қауіптілік деңгейі нақтыланды.

Зерттеудің ғылыми және практикалық құндылығы

Зерттеу жұмысының ғылыми және практикалық құндылығы ретінде зерттеу ауданы бойынша ГАЖ технологиялары мен Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерін қолдана отырып қол жеткізілген, қауіпті экзогендік процестердің қауіптілігін бағалау және олардың алдын-алу, сондай-ақ көл ақтарылуының қаупін басқаруда тиімді болып табылатын зерттеу нәтижелерін айтуға болады.

Өзен алаптарының потенциалды қауіптілігі мен мұздықтық-мореналық көлдердің гидрометеорологиялық сипаттамаларын зерттеу нәтижелерін зерттеу ауданындағы сел қауіпті объектілердің қауіптілік дәрежесін анықтау, алдын ала ескерту жүйелерін құру және сел тасқыны болған жағдайда эвакуациялау жұмыстарын уақытылы, әрі тиімді жүзеге асыру үшін, сел қаупін бағалау үшін пайдалануға болады. Зерттеу ауданы бойынша сел тасқынына ұшырауы мүмкін аумақтарды зоналау нәтижелері су шаруашылығы қызметтерін жоспарлауға, экономикалық және әлеуметтік шығындарды есептеуге, сондай-ақ халықты ақпараттандыруға және сел қаупін бағалауға негіз бола алады.

Диссертациялық жұмыстың нәтижелері Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің алдын алу және сел тасқындарының келтіретін шығынын болдырмау жөніндегі іс-шараларды әзірлеу және жүзеге асыру бойынша «Қазселденқорғау» ММ-нің оперативті жұмысында практикалық қолданысқа ие болды. Сондай-ақ, зерттеу нәтижелерін Қазақстан Республикасының Төтенше жағдайлар министрлігі, аудандық және облыстық басқармалар, ғылыми ұйымдардың жұмыстарында пайдалануға болады.

Қорғауға келесідей негізгі ғылыми зерттеу тұжырымдамалары ұсынылады:

I. Іле Алатауының орталық бөлігінде орналасқан мұздықтық-мореналық көлдердің 1970-2020 жж. аралығындағы даму динамикасы мен қазіргі жағдайын бағалау негізінде мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік таралу аймақтары мен морфометриялық сипаттамалары анықталды.

II. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің алдын алуға бағытталған жұмыстарға баға беру арқылы мұздықтық-мореналық көлдердің қауіптілігіне әсер ететін факторларды талдау негізінде қауіптілік критерийлері таңдалды. Көпкритериялық шешім қабылдау әдісі арқылы зерттеу ауданының сел қауіптілік және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарының ірі масштабты карталары (1:25 000) жасалды.

III. Зерттеу ауданының сел қауіптілік және сел тасқынына ұшырайтын аумақтар атты ірі масштабты карталарының дәлділігін арттыру мақсатында RAMMS бағдарламасы арқылы гидродинамикалық модельдеу негізінде сел арналарының қауіптілік дәрежесі нақтыланды.

Автордың жұмыстағы жеке үлесі

Зерттеу жұмысының мақсаты мен міндеттерін жүзеге асыру үшін осы уақытқа дейін жүргізілген ғылыми зерттеу жұмыстарына шолу жасалып, зерттеуге қажетті мәліметтер жинақталды. Зерттеу ауданындағы потенциалды қауіптілікті бағалау үшін әсер ететін критерийлер ГАЖ технологиялары арқылы өңделіп, жаңа карталар жасалды. Диссертацияны жазу және қолжазбаны рәсімдеу автордың жеке қатысуымен орындалды.

Жұмыстың апробациясы

Диссертациялық жұмыстың тақырыбы аясында зерттеу нәтижелері Қазақстандық және халықаралық конференцияларда баяндалды:

- Абдуллаева Ә.С. Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттары. «Фараби әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференция материалдары. Қазақ университеті, Алматы, Қазақстан. 2021. 52 б.

- Абдуллаева Ә.С. Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің қазіргі жағдайы. «Фараби әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференция материалдары. Қазақ университеті, Алматы, Қазақстан. 2022. 88 б.

- Абдуллаева Ә.С. Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторлар. «Жасыл көпір ұрпақтан-ұрпаққа» IX Халықаралық студенттер форумы. Қазақ университеті, Алматы, Қазақстан. 2022. 489-496 б.

Жұмыстың жариялануы және сыннан өтуі

Зерттеу нәтижелері бойынша Scopus базасына енетін «NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical sciences» журналының №6, 2021 нөміріне «The importance of conducting research methods to assess the state of glacial-moraine lakes» тақырыбында шетелдік ғылыми жетекшімен мақала жарыққа шықты.

Сондай-ақ шетелдік ғылыми жетекшімен «Mountain Resilience: A Tool for Mudflow Risk Management in the Ile Alatau Mountains, Kazakhstan» тақырыбында Scopus базасына енетін «Mountain Research and Development (MRD)» журналдың 43(1), 2023 нөмірінде мақала жарық көрді.

Зерттеу нәтижелерінің соңғы бөлімі бойынша ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған «Гидрометеорология және экология» журналында «Іле Алатауының орталық бөлігіндегі өзен алаптарының сел қауіптілігін бағалау және зоналау» тақырыбында мақала жарияланды, №4, 2023 ж.

Жұмыстың құрылымы және көлемі

Диссертациялық жұмыс 143 беттен, 11 кестеден, 33 суреттен тұрады. Жұмыстың құрылымы кіріспеден, 5 тараудан, қорытындыдан және 168 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

1 МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕР: НЕГІЗГІ ТҮСІНІКТЕР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ТӘЖІРИБЕСІ

1.1 Негізгі түсініктер

Мұздықтық-мореналық көлдер – биік таулы және тауалды аудандарының қолайлы физикалық-географиялық жағдайларына байланысты қалыптасатын табиғи су қоймалары [1], [2], [3], [4].

Көлдердің қалыптасуына ықпал ететін қолайлы физикалық-географиялық жағдайлар ретінде биік таулы және тауалды аудандардағы биіктік белдеуі, жер бедерінің тілімденуі, беткейлер экспозицияларының болуы, кеңістікте жауын-шашынның және ауа температурасының таралу ерекшеліктерін айтуға болады [5]. Биіктік белдеуі тау көлдерінің пайда болу, және даму ерекшеліктеріне, географиялық таралуына тікелей әсер ететін негізгі факторлардың бірі. Сонымен қатар, биіктік белдеу қар сызығының орналасуына да әсер етеді. Ауаның ылғалдылығының төмендеуі де биіктік белдеуіне байланысты, ал тау беткейлеріндегі жауын-шашынның түсуі беткейлер экспозициясына, тау жоталарының бір-біріне қатысты орналасуы, олардың қалқалаушы және тосқауылдық рөлі, жер бедерінің тілімденуі сияқты орографиялық факторларға тәуелді [5]. Таулы көлдің су және жылу режимдері тау макроөңістеріндегі күн сәулесінің экспозициясымен байланысты. Ал, жел экспозициясы күн сәулесінің әсерін күшейте отырып, зерттеу ауданының климаты мен ландшафттарына да әсер етеді.

Таулы және тауалды аудандарда әртүрлі пішіндегі көлдердің пайда болуы тектоникалық қозғалыстар мен жоғары сейсмикалық процестермен, көл қазаншұңқырларын құрайтын тау жыныстарының құрамымен, жылжымалар, сырғымалар және басқа да беткейлік процестерінің белсенділігімен байланысты [1]. Сонымен қатар, олардың қалыптасуы мен дамуына шөгінділердің түзілуі, ылғалмен қамтамасыз ету, температуралық жағдай, мұздану процесі, қар мен мұз жамылғысының динамикасы сияқты климаттық факторлар әсер етеді. Таулы көлдер туралы алғашқы мәліметтер ХІХ ғасырдың аяғы мен ХХ ғасырдың басында орыс географиялық қоғамының мүшелері Мушкетов Д.И., Лангваген В.В., Беседин П.И., Липский В.И. және т.б. ұйымдастырған экспедициялардың есептемелерінде пайда бола бастады [1]. Зерттеушілер табиғи мұздықтық су қоймаларын бір-бірінен әрдайым анық ажырата алмайтындығын айта отырып, оларды мұздық маңы, мұздықтық немесе мореналық көлдер деп атаған.

Тоқмағамбетов Г.А., Судаков П.А., Плеханов П.А., Кубрушко С.К., Ставицкий Я.С. [6], [7] зерттеулерінде мұздықтың ашық және көмкерілген бөлігінің әртүрлі еру қарқындылығының нәтижесінде көл қазаншұңқырларының пайда болу процесі орын алатындығы келтірілген. Олар ашық мұздықпен іргелес жатқан көлдерді мұздықмаңы деп атаса, Керемкулов В.А. [8] мұздықтық-ойпаңды, Шатравин В.И. және Ставицкий Я.С. [9] көлдердің қазаншұңқыры мұздықтарда орналасқандықтан, оларды

мұздықтық деп атауды ұсынған. Ал, шетелдік [10], [11], [12] зерттеулерінде мореналық көлдер деп Кіші мұз дәуірінде пайда болған мұздық пен бүйірлік және түптік моренаның арасында қалыптасатын көлдерді атаса, мұздықтық көлдер деп еріген сулар төмен қарай ағу барысында қозғалыс жылдамдығын және қозғалуына әсер ететін күштерді жоғалтып, мұздықтың тілінде судың жинақталуынан қалыптасатын көлдерді атайды. Ал, [13] зерттеулерінде мұздықтардың белсенділігі немесе мұздықтардың деградациясы нәтижесінде мұздықтың үстінде, астында, жанында немесе алдында жеткілікті мөлшерде пайда болған су массасын мұздықтық көлдер деп түсіндірген.

Биік таулы және тауалды аумақтардағы қазаншұңқырлардың еріген сумен толысуы мұздықтардың кейін шегінуімен және қазіргі мореналармен байланысты болғандықтан, оларды мұздықтық, мұздық маңы, мореналық көлдер деп атайды [1], [2], [4], [14]. Бұл негізінен мұздықтардың ашық бөлігі мен фронтальды морена арасында қалыптасқан көлдерге қатысты.

Диссертациялық жұмыста көлдердің қалыптасуы барлық жағдайда мұздықтармен немесе мореналармен байланысты болғандықтан, оларды сипаттау үшін «мұздықтық-мореналық көлдер» термині қолданылды.

Мұздықтық-мореналық көлдерге қазіргі және ежелгі мұзбасу дамыған биік таулы аудандардағы гляциологиялық, гидрометеорологиялық, геоморфологиялық факторлардың әсерінен қалыптасу және даму ерекшеліктері тән. Көлдер мұздықтардың ашық және көмкерілген бөліктерінің өзгеріске ұшырауы нәтижесінде және термокарсттық процестердің орын алуы әсерінен қалыптасса, кей жағдайда олардың пайда болуы арнаның мұздықпен немесе мұздықтық-мореналық шөгінділермен бөгелуімен байланысты [1], [2].

Мұздықтардың кейін шегінуімен қатар орын алатын мәңгі тоңды мореналардың жартылай еру процесі, әдетте криогендік жылжымалардың шөгуі нәтижесінде еріген сулармен толтырылған шөгінділердің пайда болуына әкеледі [15]. Осылайша, жаңа мореналардың түзілуі, биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуына, олардың өсуіне, дамуына жағдай жасайды.

Мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттарын, олардың физикалық жағдайы мен даму ерекшеліктерін, ақтарылу қауіптілігін сипаттау үшін, ең алдымен, олардың типтері мен жіктемелеріне тоқтала кеткен жөн.

Мұздықтық-мореналық көлдерді жіктеу оларды қандай да бір белгілері бойынша жүйелеу мақсатында жүргізіледі. 1929 жылы Молчанов Л.А. Орта Азия көлдерін типтеуге әрекет жасады [1], [3]. Ол ежелгі және қазіргі мұздықтардың іздерімен шектелген көлдер мореналық көлдерге жататындығын айтты. Кейінірек Иванов П.В. және Шульц В.Л. көлдерді морфометриялық сипаттамалары мен биік таулы ауданда таралуы бойынша жіктеуді ұсынды [3].

Орта Азия көлдерінің ең сәтті жіктемесін А.М. Никитин ұсынды [16], [17]. Ол көлдерді генетикалық типін, морфометриялық ерекшеліктерін, орналасқан жерін, көл қазаншұңқырының пішінін ескере отырып, таулы,

тектоникалық, гляциогендік (мұздықтық, карсттық, зандрлық, мореналық), гравитациялық, гидрогендік, дефляциондық-сорлы деп жіктеді.

Керемкулов В.А. Қазақстанның биік таулы аудандарының және шетелдік тау жүйелері көлдерін кеңінен талдау негізінде көлдердің генезисі, морфологиялық және морфометриялық ерекшеліктері бойынша олардың толық жіктемесін әзірледі [8]. Ол қазіргі мореналарда орналасқан мұздықтық-мореналық көлдерді генезисі бойынша ойпанды, термокарстты, карлы және бөгелмелі деп жіктеді.

1986 жылы Попов Н.В. [18] Солтүстік Тянь-Шань таулары бойынша мұздықтық-мореналық көлдерді мұздықтық, мұздықмаңы, мұздықтық-мореналық және мореналық көлдер деп 4 типке жіктеді.

Ал [1] зерттеулерінде мұздықтық-мореналық көлдер қазаншұңқырларының ерекшеліктеріне, қалыптасу жағдайларына қарай ойпанды, опырылмалы, карлы, бөгелмелі деп жіктелген.

Жоғарыда көрсетілген жіктемелер далалық зерттеу әдістерін және батиметриялық өлшеулер нәтижелерін негізге ала отырып жасалса, соңғы жылдары қашықтықтан зерттеу әдістерін пайдалана отырып мұздықтық-мореналық көлдердің жаңа жіктемелері ұсынылуда. Мысалы, [19] Landsat ғарыштық суреттерін дешифрлеу негізінде мұздықтық-мореналық көлдерді 4 типке жіктеген: 1 тип - мұздықмаңы көлдері (мұздықпен байланысы бар), мұздықтардың тілінде қалыптасып, дамитын көлдер, 2 тип – мұздықтық-мореналық көлдер, мұздық тілімен байланысы жоқ, алайда, мұздықтардан 500 м қашықтықта, жаңа мореналарда қалыптасатын көлдер, 3 тип – мореналық көлдер, Кіші мұз дәуірінің ойпаттарында немесе ескі мореналарда орналасқан көлдер, 4 тип – бөгесінді көлдер, арнаның жылжымалар мен құламалар нәтижесінде бөгелуінен қалыптасатын көлдер. Қашықтықтан зерттеу әдістерін пайдалана отырып мұздықтық-мореналық көлдерді жіктеу жоғарыда келтірілген жіктемелерге қарағанда егжей-тегжейлі емес, себебі ғарыштық суреттерді дешифрлеу, олардың кеңістіктік кескінделу мүмкіндігінің төмен болуы мұздықтық-мореналық көлдердің қазаншұңқырларының қалыптасу ерекшеліктерін, көл байламының құрамын зерттеуде қиындықтар туғызады. Капица В.П. [19] зерттеу нәтижелерінде мұздықтық-мореналық көлдердің жаңа және ескі мореналарда орналасу ерекшеліктері бойынша климаттың өзгеруіне және мұз басуға реакциясы әртүрлі болатындығын көрсетті.

Мұздықтық-мореналық көлдердің даму ерекшеліктерін сипаттау үшін Керемкулов В.А. [1], [8] көлдерді сумен толысу ерекшеліктеріне байланысты тұрақты, мезгілдік және тұрақты емес деп жіктеді. Қазаншұңқырлары еріген сумен толысқан тұрақты көлдер ұзақ уақыт бойы сақталады. Теріс ауа температурасы кезеңінің басталуымен көлге келетін су ағындысы тоқтаған кезде су деңгейі белгілі бір мәнге дейін төмендейді. Қыста көлдің суы қатып, келесі жылдың жылы кезеңінің ортасына қарай мұз бен қардан босайды. Көлге еріген судың ағып келуі және ағып кетуі жер үсті немесе жер бетіне жақын орналасқан моренаішілік каналдар арқылы жүзеге асырылады. Тұрақты көлдер көбінесе үлкен көлемдерімен ерекшеленеді.

Мезгілдік көлдер тұрақты гидрологиялық режимімен ерекшеленеді. Аталған көлдер көктем мен жаз мезгілдерінде толысып, күз бен қыс мезгілдерінде жартылай немесе толықтай көлемін жоғалтады. Бұл ең төменгі нүктелердегі көлмен гидравликалық байланысқан дренаж жүйесінің тұрақты өткізу қабілеттілігін көрсетеді. Мұндай көлдерге моренаішілік каналдармен қазаншұңқырларды еріген судан босату қасиеттері тән.

Тұрақты емес көлдер қазаншұңқырлардың еріген сумен тез толысу арқылы сипатталады. Әдетте, тұрақты емес көлдерде сел қауіптілігі жоғары болып, олар апатты сел тасқынының орын алу мүмкіндігін айқындайды.

Осылайша, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, олардың даму динамикасы және қарқындылығы мұздықтардың кейін шегінуімен, яғни климаттың өзгеруімен тікелей байланысты екендігі айқындалды. Сол себепті, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу жағдайларын, жіктемелерін, даму ерекшеліктерін зерттеу қауіпті экзогендік процестердің алдын-алу мәселелерін шешудегі ең алғашқы қадамдардың бірі деп есептеуге болады.

1.2 Мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудің әлемдік тәжірибелері

Мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудің тәжірибелерінің жандануы көлдерде потенциалды ақтарылу қауіптілігінің туындауымен байланысты. Мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеумен ХІХ ғасырда еуропалық географ-ғалымдар Ратцель Ф., Рабо Ш., Келлер Р., Тораринсон С., Каика В., Семенов-Тянь-Шанский П.П., Федченко А.П., Северцов А.А., Каулбарс А.В., Тилло А.А., Берг А.С., Стоун К., Танака К., Шиптон Э. және т.б. айналысты.

Еуропада мұздықтық-мореналық көлдердің зерттелуі

Еуропалық ғалымдар мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеумен ХVІ - ХVІІ ғасырларда айналыса бастады [20]. Мұздықтық-мореналық көлдерде зерттеу жұмыстарын жүргізуге олардың ақтарылуы нәтижесінде қалыптасқан сел тасқынының альпілік елдерге келтірген шығыны негіз болды. Жүгізілген географиялық зерттеулер нәтижесінде көлдердің ауданы, орташа және максималды тереңдігі, олардың деңгейлерінің салыстырмалы өзгеруі, жүріп өткен сел тасқындарының шығын мөлшері және т.б. сияқты мәліметтерге қол жеткізілді.

Көлдерге ұзақ мерзімді (шамамен 200-300 жыл) бақылау жүргізу нәтижесінде олардың пайда болу, толысу және ақтарылу циклдерінің кезектілігі туралы қорытынды жасалды. Еуропадағы мұздықтық-мореналық көлдердің көпшілігі мұздықтар балансының өзгеруіне байланысты ақтарылып, қайта толысқан. Мәселен, Эцталь Альпі тауындағы Айсзее мұздықтық көлі шамамен 10 рет (максималды көлемі 10 млн м³), Берн Альпі тауындағы Мэрьелен көлі 19 рет, Пеннин Альпі тауындағы Алалин мұздығының өзгерісі нәтижесінде Маттмарк көлі 40-тан астам рет ақтарылған [21], [22].

Еуропа елдерінің ішінде мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеуге Норвегияда көп көңіл бөлінеді. Норвегиялық көлдердің мөлшері мен көлемі Альпі көлдерімен салыстырғанда аса жоғары. XIX ғасырдың аяғы-XX ғасырдың ортасында норвегиялық көлдердің ақтарылуы нәтижесінде бірнеше рет апатты сел тасқындары қалыптасып, олардың максималды көлемі 25-30 млн м³ дейін жеткен [20]. Соның ішінде, XX ғасырдың 40-шы жылдары Остердалсисен көлі жыл сайын ақтарылып, апатты сел тасқынының қалыптасуына себеп болған. Нәтижесінде 1955 жылы Норвегия үкіметі сел тасқынынан қорғану үшін мұздықтың төмен бөлігінде орналасқан жартастарда, көл аңғарының жоғарғы жағында туннель салу туралы шешім қабылдаған [23]. Норвегияда мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы нәтижесінде сел тасқындары жиі қайталанады. Оған дәлел, 2001-2010 жж. аралығында Бламансисен мұздығының жанында орналасқан көл 5 рет ақтарылып, оның максималды көлемі 40 млн м³ құраған.

Гляциалды сел тасқындары жиі көрініс беретін Еуропа елдерінің қатарына Исландияны жатқызуға болады. Исландиядағы негізгі су объектілері Еуропадағы ең үлкен мұздықтардың бірі Ватнайскудльмен (ауданы 8000 км²-ден аса) байланысты [24]. Оның Атлант жағалауына қарайтын бөлігі мұздықтық-мореналық көлдермен ұштасқан көптеген үлкен және кіші мұздық тілдерге бөлінеді. Мұздықтармен бөгілген көлемі кіші мореналық көлдер мұздықтың солтүстік беткейінде де кездеседі. С. Тораринсонның бағалауы бойынша, Исландияның мұздықтық-мореналық көлдерінің ақтарылуы кезінде сел тасқының өтімі 3000 м³/с дейін, ал көлемі 10 млн м³ жетуі мүмкін [20].

Исландияда мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуы мұздықтардың деградациясы мен мұздықтардың шеткі бөліктерінің өзгеруімен ғана емес, сонымен қатар жанартаулық белсенділікпен де байланысты [25].

Арктика мен Америкада мұздықтық-мореналық көлдердің зерттелуі

Арктика және Американың субполярлы аймақтарында, соның ішінде Шпицберген мен Гренландияда мұздықтық-мореналық көлдер жақсы зерттелген. Оның зерттелуіне үлкен үлесін қосқан XX ғасырдың басында жүзеге асырылған Кембридж экспедициясы болып табылады. Экспедиция нәтижесінде зерттеу ауданындағы көлдердің жалпы саны мен сипаттамасы және Гренландияның шығыс жағалауындағы, Элсмир мен Аксель-Хейберг аралдарындағы, Канадалық арктикалық архипелагтағы жүріп өткен гляциалды сел тасқындарына сипаттама берілді [26].

Солтүстік Американың Тынық мұхиты жағалауындағы таулар да үлкен мұздықтық-мореналық көлдерге бай, олардың көпшілігі Аляска аумағында орналасқан [27]. Мұндағы мұздықтық-мореналық көлдер едәуір үлкен көлемдерімен және апатты сел тасқындарының қалыптасуымен ерекшеленеді. Сонымен қатар, аумақта гляциалды сел тасқындары белгілі бір кезеңділікпен қалыптасып (жылына немесе бірнеше жылда бір рет), оның максималды өтімі 10,2 мың м³/с дейін жетуі мүмкін [28].

Оңтүстік Американың Анд таулары да мұздықтық-мореналық көлдерге бай [29]. Көлдердің ақтарылуы нәтижесінде қалыптасқан сел тасқындарының ең көп саны Кордильер-Бланка тауларында тіркелген. 1941 жылы Уаскаран тауының маңындағы Палькакоча көлінің ақтарылуынан қалыптасқан апатты сел тасқыны Уарас қаласының 6000-нан астам тұрғынына зардабын тигізген [30].

Орта Азияда мұздықтық-мореналық көлдердің зерттелуі

Орта Азиядағы мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеу жұмыстары революцияға дейінгі (1917 жылға дейін), соғысқа дейінгі (1921-1941 жж.) және қазіргі (1950 жылдан бастап) деп үш кезеңде қарастырылады [2], [3].

Орта Азиядағы көлдердің гидрографиясы туралы ең алғашқы мәліметтер орта ғасырдағы араб және ортаазиялық географтардың X-XI ғасырларға жататын еңбектерінде көрсетілген. Ал, Орта Азия территориясында жоспарлы зерттеу жұмыстары XIX ғасырдың екінші жартысынан бастап жүргізіле бастады. Осы кезеңде мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудегі Семенов-Тянь-Шанский П.П., Федченко А.П., Северцов А.А., Каульбарс А.В., Тилло А.А., Берг А.С. атты ғалымдардың еңбегі зор.

Орта Азиядағы мұздықтық-мореналық көлдердің гидрографиясы туралы алғашқы жинақталған мәліметтер Н.Л. Корженевскийдің «Туркестан. Физико-географические очерки» атты еңбегінде көрсетілген. Аталған еңбекте әрбір ірі көлдер туралы қысқаша ақпарат және шағын көлдердің тізімі берілген. 1929 жылы шыққан Л.А. Молчановтың «Озера Средней Азии» жұмысы XX ғасырдың 60-жылдарының басына дейін Орта Азия көлдері туралы жалғыз анықтамалық болды. Жұмыста Әмудария, Сырдария, Іле, Шу, Талас, Мурғаб, Теджен, Қаракөл, Ақсу, Сарысу өзендері алаптарындағы және Ыстықкөл, Узбой және Каспий теңізі алаптарындағы жалпы ауданы 94 400 м² құрайтын 987 көл тіркелді [31]. Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық көлдер режимінің қысқаша схемалық сипаттамасы және аумақтағы көлдердің орналасуы мен олардың қалыптасу жағдайлары туралы мәліметтер тұжырымдалған.

Мұздықтық-мореналық көлдердің гидрометеорологиялық режимін стационарлық зерттеу XX ғасырдан бастап жүзеге асырылды. Көл режимдерін зерттеу экспедиция жүргізген жағалаудағы және ашық аймақтардағы ең қарапайым маусымдық гидрометеорологиялық бақылаулармен шектелді.

1936 жылы Мемлекеттік гидрологиялық институттың Ташкент филиалында Су кадастрының құрылуына байланысты Орта Азиядағы мұздықтық-мореналық көлдерге жаңа каталог жасалып, нәтижесінде көлдердің саны мен олардың ауданы туралы мәліметтер нақтыланды. Нәтижесінде жалпы саны 2400 болатын мореналық көлдер есепке алынды.

1962-1966 жж. «Ресурсы поверхностных вод» монографиясын дайындау барысында көптеген картометриялық және библиографиялық жұмыстар жасалды. Нәтижесінде көлдердің саны мен ауданы, олардың аумақ бойынша таралуы туралы мәліметтер жаңартылып, әдеби дереккөздерге аннотация жүргізілді.

1987 жылы А.М. Никитиннің «Озёра Средней Азии» монографиясы жарық көріп, онда Орта Азия көлдері туралы барлық мәліметтер жинақталды [32].

1.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің зерттелуі және физикалық-географиялық қалыптасу жағдайлары

Қазақстандағы мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу жағдайларын, даму динамикасын, морфометриялық сипаттамаларын зерттеу өткен ғасырдың екінші жартысынан бастап қарқынды жүргізіле бастады [33]. Зерттеу жұмыстарын ұйымдастыру мен жүргізу апатты сел тасқындарының жүріп өтуімен тығыз байланысты. Апатты сел тасқындары мен олардың келтірген шығыны зерттеу жұмыстарының жандануына түрткі болып, зерттеу жұмыстарының заманауи деңгейінің кезең-кезеңмен қалыптасуына ықпал етті [33].

Сол себепті, биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеу эволюциясын үш кезеңге бөліп қарастыруға болады. Зерттеудің бірінші кезеңі ретінде 1950 жылдардың басынан 1960 жылдардың ортасына дейінгі уақыт аралығы есептеледі. Дәл осы кезеңде 1950 жылдан бастап Н.Н. Пальгов, П.А.Черкасов, Н.Ф. Колотилин және Д.А. Качалов және т.б. гляциосфераны зерттеушілер қазіргі мореналарда орналасқан көлдерге қызығушылық таныта бастады [4]. Олар бұл көлдер қауіпті екендігін және ақтарылған жағдайда халық шаруашылығына айтарлықтай материалдық зиян келтіруі мүмкін деп мәлімдеді.

1951 және 1956 жылдардағы Кіші Алматы өзен алабында қалыптасқан апатты сел тасқындары нәтижесінде Іле Алатауының гляциалдық аймағына ерекше назар аударыла бастады, атап айтқанда, потенциалды ақтарылу қауіптілігі бар аумақтарға қарқынды зерттеу жұмыстары жүргізіле бастады. Осылайша, Кіші Алматы өзенінің жоғарғы ағысында Тұйықсу мұздығының мореналық кешенінде мореналық-мұздықтық көлдерді жүйелі түрде бақылау басталды.

Мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудің екінші кезеңі 1960 жылдардың ортасынан 1970 жылдардың басына дейінгі аралықты қамтиды. Бұл уақыт аралығында апатты гляциалды сел тасқындары тіркелмеген. Дегенмен, 1967-1969 жж. аралығында мұздықтар мен мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын жүйелейтін мәліметтер базасы құрыла бастады. Негізгі зерттеу объектісі ретінде Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі өзен алаптары таңдалып алынды. Аталған аумақтағы ауданы мен көлемі бойынша үлкен мұздықтық-мореналық көлдерде аспаптық геодезиялық зерттеулер жүргізілді. Алғаш рет көл алаптарының морфометриясы туралы нақты мәліметтер алына бастады. Сонымен қатар, зерттеу жұмыстарының нәтижелері [14] мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуы ауа температурасының өсуі әсерінен мұздықтардың деградациясының орын алуымен тығыз байланысты екендігін көрсетті .

Мұздықтық-мореналық көлдерді жүйелі зерттеу 1973 жылдан бастап «Қазселденқорғау» құрылғаннан кейін жүргізіле бастады. Дәл осы жылдары мұздықтардың кейін шегіну қарқындылығының ұлғаюына байланысты гляциалдық сел қауіптілігі едәуір өсті, апатты ел тасқындарының саны арта үсті [34]. Сол себепті, Іле Алатауындағы мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеумен отандық зерттеушілер қарқынды айналыса бастады. 1975 ж. бастап Плеханов П.А., Попов В.И., Токмагамбетов Г.А. мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттарын зерттеумен айналысты, сонымен қатар 1985 жылдан бастап Керемкулов В.А., Медеу А.Р., Токмагамбетов Т.Г., Благовещенский В.П., мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын зерттей отырып, олардың жіктемелік белгілерін айқындады.

Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық көлдердің күрт өсуі және дамуы олардың қатаң бақылауға алынуына ықпал етті. Потенциалды ақтарылу қауіптілігі жоғары көлдерде стационарлық бақылау бекеттері ұйымдастырылды. Батиметриялық түсірілімдер жүргізіліп, морфометриялық сипаттамалары анықталды. Осыған байланысты 1975-1976 жж Іле Алатауының мұздықтық-мореналық көлдерін ең алғашқы паспортизациялау жұмыстары жасалды [35]. Осылайша, мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеудің жаңа сапалы деңгейі қалыптасып, көлдердің морфометриясы, судың температуралық режимі және су балансы бойынша нақты мәліметтер алынды.

Қазіргі кезде мұздықтық-мореналық көлдер толысып, олардағы су деңгейі көтерілуі жер бедері объектілерінің, аумақтардың геологиялық және климаттық жағдайларының алуан түрлілігіне байланысты сел тасқыны, жылжымалар, өзен эрозиясы, сияқты қазіргі заманғы қауіпті экзогендік процестердің дамуына және жандануына ықпал етуде [36].

Сел тасқындарының ішінде, мұздықтар әрекетімен сипатталатын гляциалдық селдер ерекше орын алады. Республика аумағында әртүрлі модификациядағы гляциалды селдер 25%-ды құрайды [37]. Мұздықтық-мореналық кешендегі су айдындарының ақтарылуы су тасқындарының қалыптасуына ықпал етеді. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы нәтижесінде су тасқынының бос сынықты материалдармен өзара әрекеттесуі селдің пайда болуына әкеледі. Пайда болу ошақтарындағы су көлемі мен бос сынықты материалдардың едәуір қорына байланысты, әдетте гляциалды селдер үлкен шығын мен көлемге ие болады [14].

Қазақстан бойынша сел қауіпті аумақтың алып жатқан жиынтық ауданы 13 мың км², соның ішінде 11 мың км² ауданнан астамы Алматы облысына тиесілі [36]. Соның ішінде, Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігі төтенше жағдайлар атласындағы [38] сел қауіптілік картасына сәйкес сел қауіптілігі дәрежесі жоғары ауданға жатады.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуына физикалық және химиялық процестер тікелей әсер етеді. Біріншіден, физикалық процесс болып табылатын күн сәулесінің тікелей түсуі әсерінен мұздан босап шыққан аумақтарда теріс

формадағы микро пішінді ойыстар, шұңқырлар, ойылымдар пайда болады. Екіншіден, мұздықтардың қарқынды еруі әсерінен пайда болған ойыстар, шұңқырлар, ойылымдар сумен толысады және химиялық процестің орын алуы арқылы олардың тереңдігі немесе қазаншұңқырларының аумағы өсе түседі. Осылайша, аталған процестердің орын алуынан толысқан мұздықтық-мореналық көлдер сел тасқынының пайда болу ошағына айналады.

Іле Алатауының орталық бөлігінің сел қауіптілігі бірқатар факторлармен түсіндіріледі [39]:

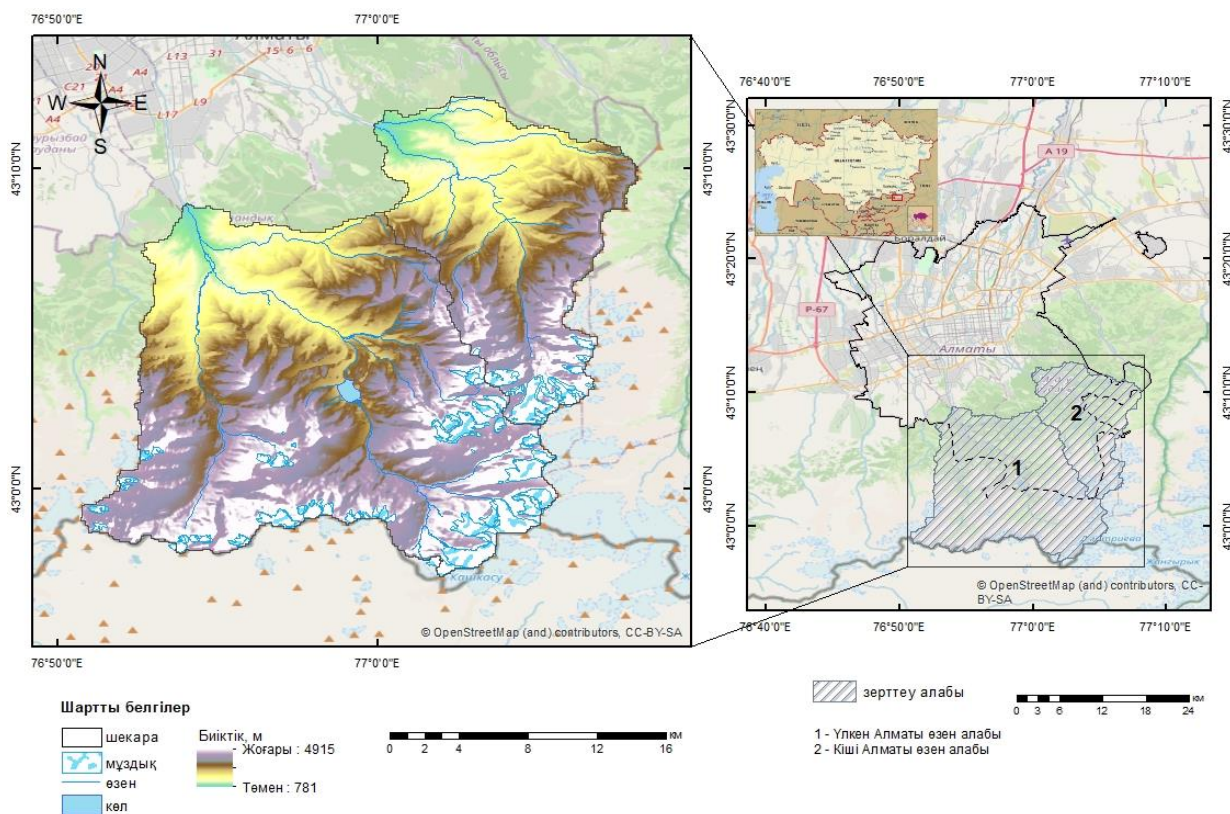
- тау шыңдары мен жоталардың ең биік белгілері;
- жауын-шашынның максималды мөлшері;
- мореналық және мұздықтық көлдердің болуы;
- сел ошақтарының болуы;
- тау-жыныстарының геологиялық ерекшеліктері және т. б.

Іле Алатауы – ендік бағытта 190 км-ге созылып жатқан Тянь-Шань тауының солтүстік тау жотасы [40]. Жотаның абсолютті биіктігі Талғар шыңында 4973 м құрайды, ал Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің таралу биіктігі 3300-3800 м аралығын қамтиды. Іле Алатауы күрделі жер бедерімен және экзодинамикалық процесстердің қарқынды дамуымен ерекшеленеді [41]. Зерттеу ауданы температура мен жауын-шашынның маусымдық ауытқуымен ерекшеленетін, климаттық жағдайлары қатаң биік таулы нивалды аймақта орналасқан [42].

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі негізгі су жинау алаптары – Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары (1-сурет). Үлкен Алматы өзені 3600 м биіктікте Үлкен Алматы көлінен бастау алады және оңтүстіктен солтүстікке қарай ағады. Ұзындығы 96 км, су жинау алабы 425 км² [43].

Кіші Алматы өзені Қаскелен өзенінің оң саласы болып табылады. Тау аймақтары Тұйықсу мұздығынан шығысқа қарай 3400 м дейін созылып жатыр, су жинау алабы 710 км², ал ұзындығы 108-109 км құрайды [43].

Сонымен қатар, Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптары және олардың салалары Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар атласы бойынша сел қауіпті аудан болып саналады [38]. Аталған өзен алаптарында жалпы ауданы 90 мың м² құрайтын 26 мұздықтық-мореналық көлдер, аэрофотосуреттер мен ғарыштық суреттерді дешифрлеу негізінде анықталған 105 сел ошағы орналасқан [44]. Мұздықтық-мореналық көлдердің биіктік бойынша үлестірілу аймағы 3000...3900 м аралығын алып жатса, ал сел ошақтарының көрініс беру диапазоны 1158-3900 м аралығын қамтиды [45]. Мұздықтық-мореналық көлдер мен сел ошақтарының биіктік бойынша үлестірілуі зерттеу ауданындағы гляциалды және нөсерлі сел тасқындарының қалыптасу зоналарының негізгі шекарасын айқындайды [4], [46], [47].



Сурет 1. Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптары

Зерттеліп отырған аудандағы маусымдық ауытқулардың әсерінен биік таулы ландшафтты белдеуде тау-жыныстарының физикалық үгілу процестері белсенді жүріп жатыр. Ол тау жыныстарының қарқынды түрде бұзылуына және үлкен массадағы бос сынықты материалдардың қалыптасуына жағдай жасауда [1].

Сонымен қатар, соңғы жылдары 5000 м дейінгі биіктікте (24.07.2023 ж. 5110 м) нөлдік изотерманың тіркелуіне байланысты осы аймақта жаңа мореналардың қалыптасуы белсенді жүруде. Олар мұздықтардың кейін шегіну барысында биіктігі 150-200 м-ге дейін жететін бірнеше фронталды кертпештердің пайда болуымен сипатталады. Мореналар негізінен құрамында кемінде 0,4% сазды-шанды фракциялары бар ірі құмнан құралған жұмырланбаған сынықтары басым қиыршықтасты-жақпартасты материалдардан түзіледі. Іле Алатауының мореналарында 2 мм-ден ірі сынықты жыныстар және ұсақ түйіршікті толтырғыштардан (фракциялары 2 мм-ден кіші) тұратын ірі сынықты жыныстар басым болып келеді [2]. Зерттеліп отырған аймақта кіші мұз дәуірінде жиналған көмкерілген мұздықтары бар жаңа мореналардың ауданы 91,63 км²-ті құрайды [48].

Осылайша, апатты жағдайлардың алдын-алу мақсатында, мұздықтық-мореналық көлдерге экспедициялық, аэровизуалды бақылау жүргізу жұмыстарымен «Қазселденқорғау» мемлекеттік мекемесі қарқынды айналысуда. Сондай-ақ ғылыми зерттеулердің орталығы болып табылатын «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ мұздықтық-мореналық

көлдердің табиғатын, олардың пайда болуы, қалыптасу мен даму жағдайларын зерттеуде аса маңызды нәтижелерге қол жеткізіп отыр. Сонымен қатар, ғылыми зерттеулер нәтижесінде ақпараттар жинақталып, монографиялар, мақалалар шығарылуда.

Сонымен қатар, зерттеулердің қазіргі заманғы әдістерін қолдана отырып, мұздықтық-мореналық көлдердің, соның ішінде потенциалды ақтарылу қаупі бар көлдердің динамикасы туралы мәліметтер базасын толықтыру жалғасуда. Сондай-ақ, мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеуде жер бетіндегі өлшеулер жиынтығынан басқа, қашықтықтан зондтау әдістері де кеңінен қолданылады (А.К. Mussina et al., 2022). ГАЗ технологиялары мен қашықтықтан зондтау мәліметтерін дешифрлеуге арналған бағдарламаларды қолдана отырып, кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі жоғары ғарыш түсірілімдері бойынша мореналық көлдер динамикасына зерттеулер жүргізіледі. Қазіргі таңда бұндай зерттеу жұмыстарымен қарқынды айналысып жатқан «ЮНЕСКО қамқорлығымен 2 санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы» болып табылады. Әсіресе жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерін пайдалану, жер беті зерттеу әдістері мүмкін емес жағдайларда, мысалы, жетуі қиын, қауіпті, шалғай аумақта орналасқан мореналық көлдерді айқындауға, олардың уақыт бойынша өзгеріс динамикасын анықтауға, сондай-ақ мұздықтық-мореналық кешенде жүріп жатқан процесстер мен құбылыстардың өзара байланысын зерттеуде аса маңызды болып табылады [49].

ҚОРЫТЫНДЫ

Бірінші тарауда зерттеу объектілері, олардың қалыптасуы бойынша физикалық-географиялық жағдайлары, негізгі ұғымдар мен қолданылатын терминдер сипатталған.

Мұздықтық-мореналық көлдер шектеулі уақыт кезеңін қамтитын, уақыт бойынша салыстырмалы түрде өте тез өзгеретін және таулы аймақтардың ерекше жағдайларына бағынатын бірегей су қоймалары болып саналады.

Көлдің ақтарылуы алаптағы су өтімдерінің айтарлықтай артуына әкелетін көл қазаншұңқырларының босауын білдіреді. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуынан туындайтын қауіпті анықтау кезінде қауіпті құбылыстың даму ықтималдығын және оның қарқындылығын ескеру қажет.

Мұздықтық-мореналық көлдер туралы көптеген ғылыми зерттеулердегі негізгі түсініктерге сүйене отырып, олардың қалыптасуы гляциологиялық, криогендік, гидрометеорологиялық, геоморфологиялық факторлардың кешенді әсер етуімен байланысты екендігі анықталды. Зерттеу барысында, мұздықтық-мореналық кешенде ғылыми-зерттеу жұмыстарын ұйымдастыру мен жүргізудің заманауи негіздері кезең-кезеңімен қалыптасқандығы айқын көрінді. Сондай-ақ, мұздықтық-мореналық көлдер жөнінде жүргізілген ғылыми-зерттеу жұмыстары зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу жағдайларын, қазаншұңқырларының пішіндік ерекшеліктерін және мұздықтармен байланысын анықтауға негіз болды.

Сонымен қатар, Қазақстандағы ғылыми-зерттеу жұмыстарының даму кезеңдері аймақтағы апатты сел тасқындарының өтуімен тығыз байланысты екендігі анықталды.

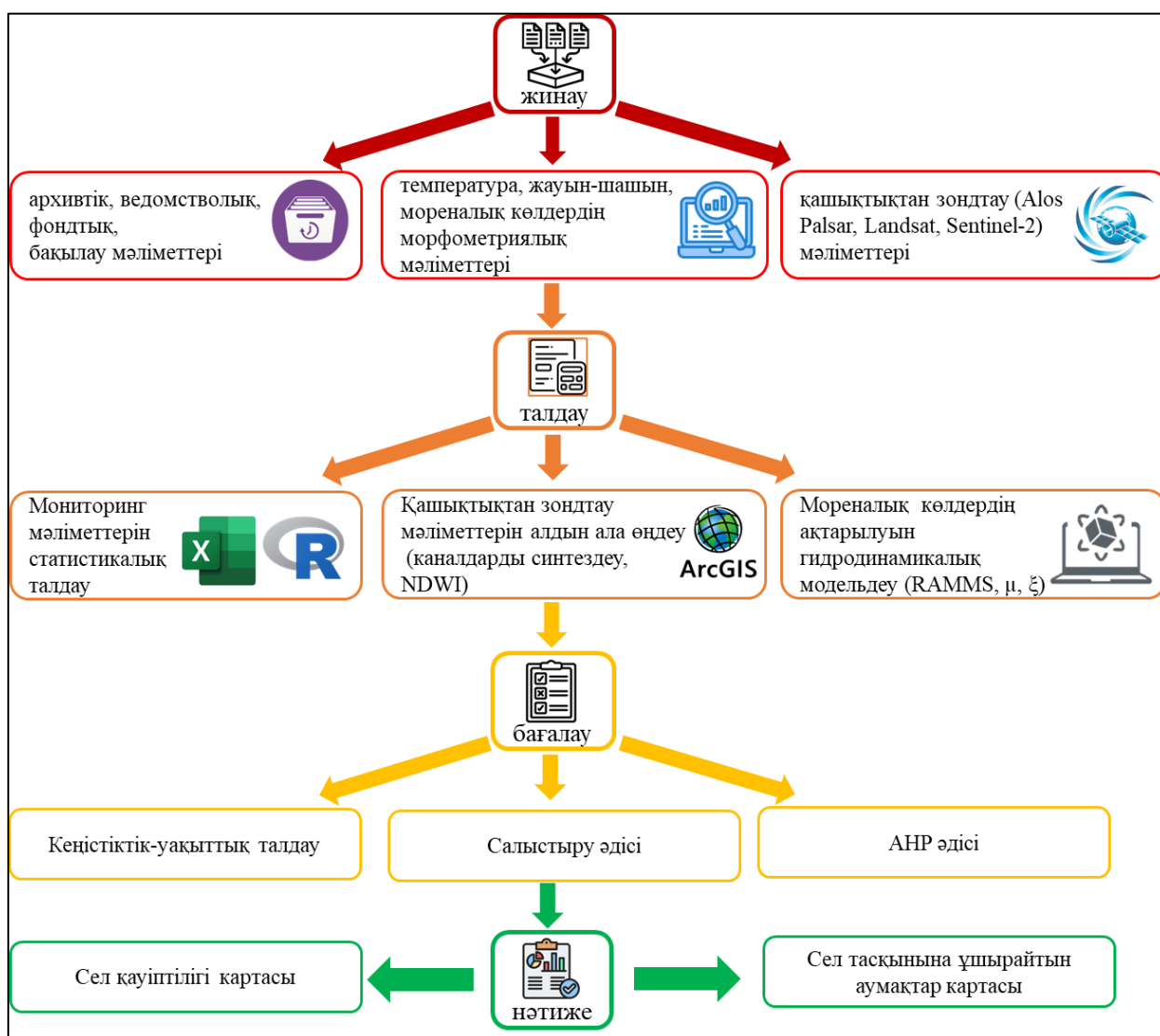
Мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу және даму жағдайларын зерттеу генезисі бойынша гляциалды сел тасқындарының алдын алу мақсатында маңызды болып табылады. Олардың пайда болуы мен одан әрі дамуының негізгі жағдайлары мен факторларына климаттың өзгеруі, мұздықтардың динамикасы, көлдерге келіп құятын су ағындыларының гидрологиялық режимі жатады.

Қорытындылай келе, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, олардың даму динамикасы және қарқындылығы мұздықтардың кейін шегінуімен, яғни климаттың өзгеруімен тікелей байланысты екендігі айқын болып отыр. Сол себепті, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу жағдайларын түбегейлі зерттеу, қауіпті экзогендік процестердің алдын-алу мәселелерін шешуде аса маңызды рөлге ие.

2 ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі өзен алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау кешенді зерттеу әдістерінің жүргізілуімен сипатталады (2-сурет). Оларды үш негізгі кезеңге топтастыруға болады: жинау, өңдеу, бағалау кезеңдері.

Бұл кезеңдерде мұздықтық-мореналық көлдер, мұздықтық-мореналық кешеннің метеорологиялық жағдайы, жер бедерінің ерекшеліктері жөнінде далалық, статистикалық, қашықтықтан зондтау және ГАЖ-технологиялары мен гидродинамикалық модельдеу арқылы мәліметтер алынды.



Сурет 2. Зерттеу әдістері

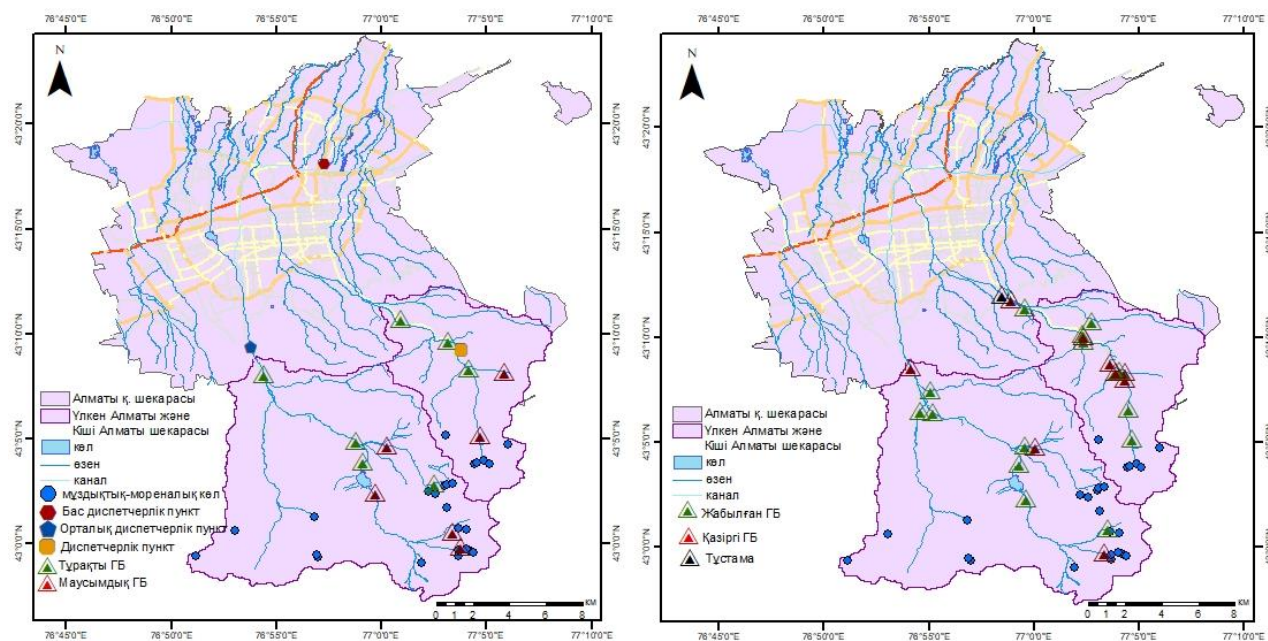
2.1 Далалық зерттеу әдістері

Далалық зерттеу әдістеріне экспедициялық, жартылай стационарлық және стационарлық бақылау түрлері жатады. Бұл зерттеу әдістерінің

нәтижесінде мұздықтық-мореналық көлдерге қатысты бастапқы мәліметтерге қол жеткізуге болады.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігінде стационарлық зерттеу жұмыстары арнайы және маусымдық бекеттердің жұмыс атқаруымен жүзеге асырылады. Бақылау бекеттерінің негізгі міндеттері мұздықтық-мореналық кешендегі көл суының деңгейі, көлемі, су және ауа температурасы, жауын-шашын, қардың биіктігі жөніндегі мәліметтерді беру болып табылады.

Бақылау желісін ұйымдастырудың көпжылдық тәжірибесі өзен алаптарында арнайы және маусымдық бекеттерді орналастырудың белгілі бір әдістемесін жасауға мүмкіндік берді. Қазіргі уақытта «Қазселденқорғау» ММ мәліметтері бойынша Үлкен Алматы өзен алабында 4 тұрақты және 4 маусымдық бекет, Кіші Алматы өзен алабында 3 тұрақты және 2 маусымдық бекет жұмыс істейді (3а-сурет). Маусымдық бекеттер сел қауіпті кезеңде іске қосылады. Сондай-ақ, «Қазгидромет» РМК бойынша Үлкен Алматы өзені алабындағы жұмыс істеп тұрған бекеттер саны - 5, жабылып қалған бекеттер саны - 5. Кіші Алматы өзені алабында 5 стационарлық бекет, 7 жабылып қалған бекет, сондай-ақ су өтімі өлшенетін 1 тұстама орналасқан (3б-сурет). Бақылау бекеттерінің саны мен тығыздығы және олардың орналасуы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігі дәрежесімен, қауіпті аудандарда орналасқан шаруашылық объектілерінің болуымен анықталады. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында орналасқан бекеттердің сұлбасы 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3. Үлкен және Кіші Алматы өзендер алаптарындағы гидрологиялық бекеттердің орналасу картасы а) «Қазселденқорғау» ММ бақылау желісі; б) «Қазгидромет» РМК бақылау желісі;

Жоғарыда келтірілген суретке сәйкес Үлкен және Кіші Алматы сел алаптары бақылау бекеттерімен жақсы қамтылған және мұздықтық-

мореналық көлдердің потенциалды қауіптілігі анықталған жағдайда, бұл объектілер бақылау желісімен қамтамасыз етіледі. Бекеттерден алаптың гидрометеорологиялық жағдайын сипаттайтын мәліметтерді тәулік бойы жұмыс жасайтын ақпаратты қабылдау мен беруді қамтамасыз ететін диспетчерлік пункттердің мамандары қабылдайды.

Стационарлық зерттеу нәтижесінде алынған мұздықтық-мореналық кешеннің гидрометеорологиялық сипаттамаларын талдау барысында экспедициялық зерттеу жұмыстарын жүргізу туралы шешімдер қабылданады. Экспедициялық зерттеу жұмыстары келесі ретте жүзеге асырылады [50]:

- мұздықтық-мореналық кешенді барлау арқылы зерттеу;
- мұздықтық-мореналық кешенді мамандандырылған зерттеу.

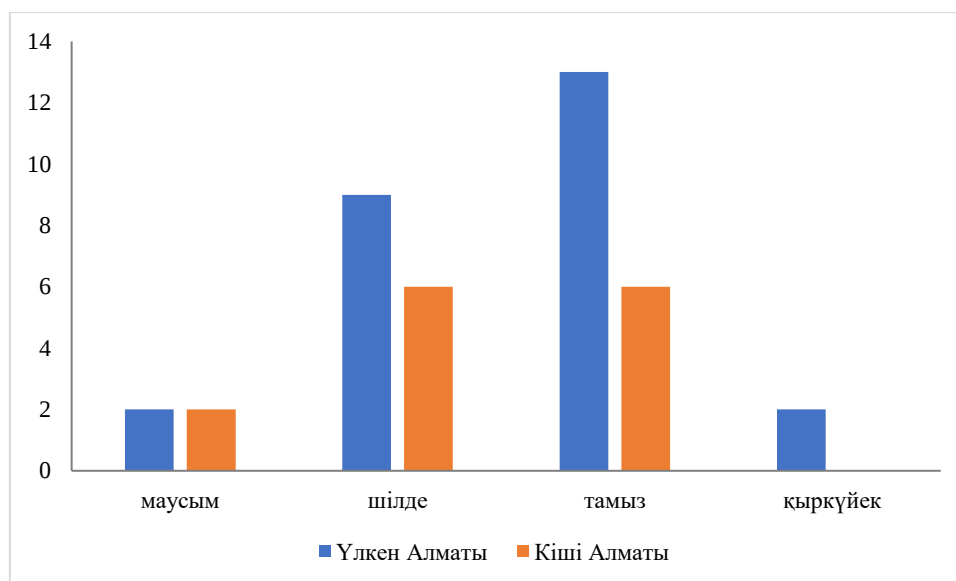
Мұздықтық-мореналық кешенді барлау арқылы зерттеу аэровизуалды және жер беті бақылау әдістері арқылы жүзеге асырылады. Олардың негізгі міндеттері зерттеу ауданының сел қауіптілігін фондық бағалау, мамандандырылған зерттеу жұмыстарын қажет ететін аса белсенді және қауіпті мұздықтық-мореналық көлдерді анықтау, арнайы мамандарды зерттеу ауданына жеткізу үшін тікұшақты қондыруға ыңғайлы орынды таңдау және дешифрленген аэрофототүсірілімдердің нәтижелерін нақтылау болып табылады.

Барлау жұмыстарының нәтижелері мамандандырылған зерттеулер бағдарламасын жасау үшін негіз болып табылады. Бұл зерттеу әдісін жүзеге асыру барысында бұрын жүріп өткен сел тасқындарының сипаттамалары және олардың қайталанғыштығы, зерттеу ауданындағы бос сынықты материалдардың физикалық-механикалық сипаттамалары анықталады және де сел қауіпті көлдерге зерттеу жұмыстары жүргізіледі [50].

Сонымен қатар, мамандандырылған зерттеулердің нәтижесінде сел қауіптілік дәрежесі жоғары мұздықтық-мореналық көлдерге жыл сайын бақылау жұмыстарын жүргізу туралы шешім қабылданады. Жыл сайынғы бақылау жұмысының негізгі мақсаты – әрбір жылдағы сел тасқыны өтімінің ең жоғары мәндері туралы, сел ошақтарындағы сел түзуші бос сынықты материалдар көлемінің өзгеруі және эрозияланған алаптардың үгілу қабығының қалыңдығы туралы, мұздықтық-мореналық көлдердің сипаттамалары мен сел қауіптілік дәрежесінің өзгеруі туралы және т.б. сенімді ақпарат алу болып табылады.

Зерттеу ауданында экспедициялық зерттеу жұмыстары жүргізілмес бұрын, бекеттерден келіп түскен мәліметтер талдана отырып, негізгі сел қауіпті аудандарды алдын ала анықтау мақсатында әдеби және басқа да мәліметтер бойынша жүріп өткен селдер туралы фондтық, ведомстволық мұрағаттар және картографиялық, аэрофототүсірілім мәліметтері жинақталып, талдануы тиіс. Бұл мәліметтерге сәйкес, Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігінде 1950-2021 жж. аралығында жүріп өткен гляциалды сел тасқындарының көрініс беруі маусым-қыркүйек айлары аралығына тиесілі екендігі анықталды (4-сурет). Сол себепті, бұл айлар

«Казселденқорғау» ММ-де сел қауіпті кезең ретінде маусым-қыркүйек айлары бекітіліп, барлау жұмыстарының жүзеге асырылуымен сипатталады.



Сурет 4. Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарында жүріп өткен гляциалды сел тасқындарының айлар бойынша таралуы

Аумақты аэровизуалды барлау жұмыстары «Казселденқорғау» ММ-нің басшылығымен тікұшақ арқылы жүргізіледі [51]. Себебі, оның ұшу жылдамдығы төмен және барлау жұмыстарын жүргізу үшін оңтайлы. Зерттеу жұмысы алдын ала картада белгіленген маршрут бойынша, мұздықтық-мореналық көлдердің жай-күйі туралы қосымша ақпарат алу үшін, сондай-ақ сел қауіптілігін фондық бағалау мақсатында жүргізіледі [36]. Аэровизуалды бақылау барысында, мұздықтық-мореналық көлдердің тек жағдайы бағаланып қоймай, сонымен қатар сел тасқындарының қалыптасу процесін бақылауға мүмкіндік береді.

Ал, жер бетілік барлау кезеңінде аэровизуалды бақылау барысында алынған барлық мәліметтер нақтыланады, сондай-ақ мамандандырылған зерттеу жұмысын жүргізу үшін бақылау объектілері таңдалынады.

Мамандандырылған зерттеу жұмысын жүргізу барысында мұздықтық-мореналық кешендегі көлдердің ақтарылу қауіптілігін анықтайтын критерийлері бағаланады. Ақтарылу қауіптілігінің критерийлері ретінде сел алабындағы мұздықтар кешені (мұздықтың ауданы, сызықтық өлшемдері, мұздықтардың кейін шегіну қарқындылығы), мұздықтық-мореналық кешен (мұздықтық-мореналық көлдердің көлемі, көл режимі жайында мәліметтер, көлдің сызықтық өлшемдері, көл қазаншұңқырының жай-күйі, көлдің байламы) сипаттамаларын алуға болады [35]. Аталған критерийлерді бағалау мақсатында арнайы экспедициялық топтар зерттеу жұмыстарын жүргізеді. Бұл жұмыстарды жүргізу барысында гидрологиялық, геодезиялық, батиметриялық зерттеулер жүзеге асырылады.

Мамандандырылған зерттеу жұмыстары нәтижесінде тау жоталарының аумағында біркелкі орналасқан және де халық шаруашылығы объектілеріне қауіп төндіретін мұздықтық-мореналық көлдер жыл сайынғы бақылау объектісі ретінде таңдалады. Бақылау объектілері «Қазселденқорғау» ММ-мен арнайы құжатталады.

Биік таулы аудандарда орналасқан мұздықтық-мореналық көлдерді құжаттау, ең алдымен олардың жалпы санын, жай-күйін, қауіптілік деңгейін анықтауда маңызды [52]. Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің жай-күйін бағалаудағы жүзеге асырылатын зерттеулердің нәтижелерін жинақтау мақсатында, 1975 жылы ең алғашқы құжаттау (паспортизациялау) жұмыстары жүргізілді [51]. Құжаттарда мұздықтық-мореналық көлдердің жай-күйін бағалау мақсатында олардың орналасу сұлбалары, қысқаша сипаттамасы, көл қазаншұңқырының типі, көлдердің орналасу биіктігі, ұзындығы және ені, көл айдынының ауданы, тереңдігі, су көлемі айқындалады. Дегенмен, «Қазселденқорғау» ММ мұздықтық-мореналық көлдерді құжаттау мәліметтерінде аталған параметрлер тек батиметриялық жұмыстар жүргізілген көлдер мен бұл жұмыстардың жүргізілу уақытына тиесілі.

Жүргізілген далалық және стационарлық зерттеу нәтижелерінің негізінде анықталған потенциалды қауіпті объектілері автоматтандырылған бақылау жүйелерімен жабдықталады. Автоматтандырылған бақылау жүйелері қоршаған ортаның жай-күйін, тіршілікті қамтамасыз ету, ақпаратты жинау және беру, объектілерді физикалық тұрғыдан қорғау үшін сенсорлық жүйелермен жабдықталған автоматты бекеттерді қолдану арқылы жүзеге асырылады [53]. Сел қауіптілігін бақылаудың автоматтандырылған жүйелері бес типті станцияларды қамтыған: мұздықтық-мореналық көлдердегі станциялар, сел ошақтарындағы станциялар, сел арналарындағы станциялар, селден қорғану имараттарындағы станциялар, мәліметтерді жинауға және өңдеуге арналған сервері бар орталық диспетчерлік пункт және оператордың автоматтандырылған жұмыс станциясы [3]. Мұздықтық-мореналық көлдердегі станциялар гляциалды сел тасқындарының қалыптасуына ықпал ететін гидрометеорологиялық жағдайларды бақылауға арналса, сел ошақтарындағы станциялар нөсерлі сел тасқындарының қалыптасуына ықпал ететін гидрометеорологиялық жағдайларды бақылайды. Соның нәтижесінде гляциалды және нөсерлі сел тасқындары болжанып және олардың қалыптасу жағдайлары мен жүріп өту жолындағы әсер ету зоналары анықталады. Сел арналарындағы станциялар сел қауіптілін болжауға, селдің қалыптасу жағдайын және сел процесінің дамуын бақылауға арналса, селден қорғану имараттарындағы станциялар бөгеттегі су деңгейі, ауа температурасы жайында мәліметтерді беріп отыруға, сел тасқынының қауіптілігін бақылауға мүмкіндік береді. Орталық диспетчерлік пункт мәліметтерді жинау, өңдеу және талдау, бақылау станцияларын басқару, сондай-ақ мемлекеттік органдар мен тұрғындарды сел қауіптілігі, сел қаупі және селдің пайда болуы туралы алдын ала ескерту үшін шешім қабылдау орталығы қызметін атқарады.

Автоматтандырылған бақылау жүйелері бақылау объектісіне жақын жерде орналастырылады [53]. Биік таулы мұздықтық-мореналық көлдер үшін – көл акваториясына жақын жерде бақылау датчиктерінің сенімді аумақта орналасуын қамтамасыз ететін, қабылдау пункттерімен (диспетчерлік), тіршілікті қамтамасыз ету жүйелерімен (аккумуляторлар немесе күн панельдері) сенімді радиотелефондық байланыс жөніндегі талаптарға жауап беретін алаң таңдалады. Сел ошақтары үшін – автоматтандырылған бекеттер сел қауіпті өзеннің түзу сызықты учаскесіне қатысты беткейде, жүріп өткен сел тасқыны деңгейінің белгілерінен жоғары аумақта орналастырылады. Бұл бекеттердің конструкциялары мен комплектациясы мұздықтық-мореналық көлдерде орнатылған автоматты бекеттерден айтарлықтай ерекшелігі жоқ. Сел арналары үшін - автоматтандырылған бекеттердің датчиктері гидрологиялық сипаттамаларды (су деңгейлері мен су өтімдері), ауа мен судың температурасын, атмосфералық жауын-шашынды, сейсмикалық жағдайды (көл бөгеттеріндегі мүмкін болатын құламаларды бақылау үшін) бақылауды жүзеге асырады. Автоматтандырылған бекеттер датчиктер жүйесінің жұмысын басқарумен қатар, аумақтың жай-күйін үнемі бақылауға мүмкіндік беретін бейнекамералармен жабдықталады. Автоматтандырылған бекеттердің негізгі міндеті қоршаған орта компоненттерінің жай-күйі жайында ақпаратты жинау мен беруден басқа, көлдің ақтарылу немесе арна бойынша сел тасқынының қалыптасу жағдайларын дер кезінде анықтау және шешім қабылдау пункттеріне қауіптілік сигналын уақытылы жеткізу болып табылады.

2019-2021 жж. аралығында Үлкен Алматы өзен алабында 12 және Кіші Алматы өзен алабында 8 автоматтандырылған бақылау станциялары орнатылды. Соның ішінде, мұздықтық-мореналық көлдерде орналасқан станциялар саны – 5, сел ошақтары мен сел арналарында – 11, селден қорғану имараттарында – 4 станция орналасқан. Олар көлдің су деңгейі, су және топырақ температурасы, жауын-шашын қарқындылығы мен мөлшері, байлам топырағының ылғалдылығы сияқты сипаттамаларды өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы гляциалды және нөсерлі генезистегі сел тасқындарының қалыптасуына әсер ететін сел қауіпті объектілердің климаттың ғаламдық жылынуы мен мұздықтардың кейін шегіну жағдайында жылдан-жылға артуымен, сондай-ақ сел тасқынының жүріп өту зонасындағы инфрақұрылымдық объектілерінің қарқынды дамуымен түсіндіріледі. Төтенше жағдайлар министрлігінің 2021 ж. мәліметтері бойынша Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында жалпы шығыны 5,9 млрд.теңгені құрайтын жалпы саны 173, соның ішінде өндірістік (99), әлеуметтік (57) және экологиялық (17) объектілер орналасқан.

Дегенмен, климаттың өзгеру жағдайында Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық кешеннің, соның ішінде мұздықтық-мореналық көлдердің жай-күйін бақылау үшін жоғарыда көрсетілген зерттеу әдістері негізінде қол жеткізілетін мәліметтер жеткіліксіз. Себебі, мұздықтық-мореналық көлдер санының артуы, мұздықтық-мореналық кешендегі

мұздықтардың деградациясы аумақтағы сел қауіптілігін арттыра түсуде. Ал, бақылау бекеттері мен автоматтандырылған бақылау жүйелері зерттеу алабындағы барлық сел қауіпті объектілерді қамтымаған. Сол себепті, Үлкен және Кіші Алматы өзен алабының жай-күйін кешенді бақылау және бағалау үшін Жерді қашықтықтан зондтау (ЖҚЗ) және ГАЖ технологияларын пайдалану қажеттілігі туындап отыр.

Қорытындылай келе, далалық зерттеу әдістерін талдау барысында елімізде жүзеге асырылатын экспедициялық және стационарлық бақылау жұмыстары сипатталып, олардың мұздық-мореналық көлдерді зерттеудегі жетістіктері мен маңыздылығына талдау жасалып, автоматтандырылған құрылғылардың сел қауіпінің зиянды салдарын төмендетудегі рөлі бағаланып, Жерді қашықтықтан зерттеу әдістерінің қажеттілігі айқындалды.

2.2 Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері және ГАЖ технологиялары

Төтенше жағдайлардың алдын алу, бақылау және болжау үшін картографиялық материалдар, Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері және гидрометеорологиялық сипаттамаларды қамтитын ақпараттық ресурстар қажет [54]. Осылайша, қажетті мәліметтерді ұйымдасқан түрде сақтау және іздеу, оны өңдеу және талдау үшін компьютерлік технологияға негізделген заманауи тиімді құралдарды пайдалану қажеттілігі туындады [55]. XX ғасырдың аяғынан бастап компьютерлік технологиялардың дамуы және географиялық ақпараттық жүйелердің кеңінен қолданылуымен байланысты ғарыштық суреттерді пайдалану қарқынды дами бастады. Қашықтықтан түсірілген ғарыштық суреттер жер бетінде, атмосферада, құрлықта және мұхитта болып жатқан процестер мен құбылыстарды визуализациялауға мүмкіндік береді. Қазіргі уақытта жер бетімен тікелей байланыссыз Жерді қашықтықтан зондтау арқылы түсірілетін мәліметтер ғарыштан келетін электромагниттік сәулеленуді тіркеу арқылы жүзеге асырылады [4]. Ғарыштық суреттер келесі мәселелерді шешуде тиімді:

- табиғи және техногендік әсерлермен байланысты төтенше жағдайларды бақылау;
- Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері мен қосымша материалдарды пайдалана отырып, белгілі бір аумақтар шегінде транспорттың қолжетімділігін зерттеу;
- табиғи және техногендік сипаттағы төтенше жағдайлар аймақтарында авариялық-құтқару жұмыстарын жоспарлау;
- төтенше жағдайлардың, қираған ғимараттардың, құрылыстардың салдарын картаға түсіру.

Қашықтан зондтау мәліметтері әртүрлі ГАЖ жүйелерінде мәліметтер базасын жасау үшін, соның ішінде базалық қабат ретінде қолданылады. Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерінің бірқатар сипаттық ерекшеліктері бар

[56], атап айтқанда түсіру жиілігі, мәліметтерді алу жеделдігі, зерттелетін аумақтарды қамту пайызы, мәліметтердің сапасы.

Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерін өңдеу әдістері алдын ала және тақырыптық болып бөлінеді, сондай-ақ, арнайы компьютерлік бағдарламаларда жүзеге асырылады. ЖҚЗ мәліметтерін алдын ала өңдеу ғарыштық суреттерді геометриялық, радиометриялық, атмосфералық коррекциялауды және суреттің географиялық байламын қамтиды. Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері аумақ туралы толығырақ ақпарат алуға мүмкіндік береді, өйткені арнайы карталарда мәліметтерді генерализациялау есебінен барлық шағын (кіші көлдер, соқпақ жол, ағаш түрлерінің өзгеруі және т.б.) объектілерді көрсету мүмкін емес. Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерінің сапасы мен қолдану аясы келесі сипаттамаларға байланысты:

- кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі;
- спектрлік кескінделу мүмкіндігі;
- радиометриялық кескінделу мүмкіндігі;
- уақыттық кескінделу мүмкіндігі.

Кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі дегеніміз – ғарыштық суретте айқын көрінетін ең кішкентай объектінің өлшемін сипаттайтын шама.

Ғарыштық суреттер кеңістіктік кескінделу мүмкіндігіне байланысты 6 типке бөлінеді: кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі төмен ($n \cdot 1000$); кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі орташа (100-1000 м), кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі салыстырмалы жоғары (30-100 м), кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі жоғары (10-30 м), кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі өте жоғары (1-10 м) және кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі аса жоғары (1 м-ден аз).

Қазіргі уақытта кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 30 см құрайтын FC ең жақсы деп саналады (WorldView спутнигі-3). Бұл 30×30 см өлшемді объект суретте бір пиксель түрінде көрсетілетінін білдіреді.

Тиімді бақылау жүйесінде электромагниттік спектрдің мүмкін болатын кең диапазонында кескінделу мүмкіндігі әртүрлі белсенді және пассивті зондтау құралдарымен жабдықталған айналмалы, күн-синхронды орбиталардағы ғарыш аппараттарын қоса алғанда, ғарыш сегментін қамтуы керек. Қазақстан аумағы бойынша ғарыштық суреттерді NOAA (кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 1100 м) және EOS AM TERRA (кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 250 м) сияқты жалпыға қолжетімді ғарыш жүйелерінің мәліметтер базасынан алуға болады. Кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі жоғары жүйелердің ішінде ең қолжетімді мәліметтер Meteor-3M (кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 37 м) және үнділік IRS 1C/1D (кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 5,6 м) спутниктеріне тән.

Қазақстан аумағын микротолқынды диапазондағы тұрақты ғарыштық зерттеулерге кедергі келтіретін қалың бұлт қабаты жиі басатындықтан, бұл аумақ үшін белсенді зондтау мәліметтерін, атап айтқанда, канадалық RADARSAT-1 спутнигінің мәліметтерін пайдалану тиімді. Бұл спутник бұлттың болуына және тәулік уақытына қарамастан, кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 8-ден 100 м дейінгі жер бетінің жоғары сапалы суреттерін алуға

мүмкіндік беретін радармен жабдықталған. Радарлық суреттер әсіресе мұздықтардың, мұздықтық-мореналық кешеннің жай-күйін картаға түсіруде, су бетіндегі мұнай қалдықтарын анықтау, апатты гидрологиялық құбылыстарды бақылау кезінде кеңінен қолданылады. Алайда, қазіргі уақытта аталған кеңістіктік кескіндеу мүмкіндігі жоғары ғарыштық суреттер қол жетімді емес және үлкен қаражатты қажет етеді.

Спектрдің көрінетін диапазонында түсірілген ғарыштық суреттер Жерді қашықтықан зондтау мәліметтерінің ішінде кең таралған және қолжетімді. Оған NASA Earthdata, Copernicus EU, Google Earth, USGS және т.б. қызметтері ұсынатын ғарыштық суреттерді жатқызуға болады. Бірнеше спектрлік арналарды қамтитын қолжетімді мәліметтер ұсынатын ғарыштық жерсеріктеріне Landsat, Sentinel, Aqua, Terra және т.б. жатқызуға болады.

Зерттеу объектілерін қашықтықтан бақылау үшін түсірілген ғарыштық суреттер геокеңістіктік мәліметтерді талдауға арналған платформалардың немесе бағдарламалық құралдардың, ГАЖ технологияларының көмегімен өңделеді. Солардың ішінде, Google Earth Engine пайдаланушыларға ғарыштық суреттерді визуализациялауға және талдауға мүмкіндік беретін талдау платформасын айтуға болады. Ол 40 жылдан астам тарихи және қазіргі ғаламдық ғарыштық суреттердің мұрағатын, сонымен қатар сол үлкен мәліметтер базасын талдау және зерттеу үшін қажетті есептік және басқа да құралдарды қамтиды. Сонымен қатар, аталған платформа үлкен мәліметтер жиынтығын талдау үшін API (application programming interface) және басқа да құралдарды ұсынады. ENVI – ЖҚЗ мәліметтерін визуализациялауға және өңдеуге арналған бағдарламалық өнім, ол ғарыштық суреттерді ортотрансформациялау мен кеңістіктік байлам жасаудан бастап қажетті ақпаратты алуға және оны ГАЖ арқылы біріктіруге дейінгі мәліметтерді өңдеудің толық циклін жүзеге асыруға арналған құралдар кешенін қамтиды. ERDAS IMAGINE — ЖҚЗ мәліметтерін өңдеуге және жұмыс істеуге арналған растрлық мәліметтермен графикалық редактор және бағдарламалық өнім. Ол ГАЖ технологияларында әрі қарай жұмыс жасау үшін әртүрлі картографиялық суреттерді өңдеуге, визуализациялауға және дайындауға мүмкіндік береді.

ГАЖ технологиялары бақылау нәтижелерін сақтау, өңдеу және талдау үшін өте тиімді құрал болып табылады. ГАЖ ортасында жер бетіндегі құбылыстар мен оқиғаларды талдау, оларға әсер етуші негізгі факторлар мен себептерді анықтау, оларға қатысты стратегиялық шешімдерді жоспарлау және жүзеге асырылатын іс-әрекеттердің потенциалды салдарын талдау мүмкіндіктеріне қол жеткізуге болады. ГАЖ технологияларының басты артықшылығы – оның көп деңгейлі синтездеу және талдау мүмкіндігі. ГАЖ ортасында әртүрлі мазмұндағы тақырыптық мәліметтерді біріктіру және синтездеудің нәтижелерін талдау арқылы қажетті жаңа өңделген мәліметтерге қол жеткізуге болады.

Қазіргі уақытта ГАЖ технологиялары төтенше жағдайларды бақылау және болжауға арналған жүйелі және сенімді құралдардың бірі болып

табылады. Сонымен қатар, ГАЖ ортасында кеңістіктік байлам жасалған мәліметтермен жұмыс істеу ыңғайлылығы, қолжетімді ГАЖ өнімдерінің (ArcGIS, MapInfo, ArcView, QGIS) кең таралуы ГАЖ технологияларына деген сенімділікті арттыра түсті.

ГАЖ – су ресурстарын зерттеуде, соның ішінде су жинау алаптарын бөлуде, морфометриялық талдауда, су объектілерін сандық, сапалық, кеңістіктік, уақыттық бағалауда, мұздықтық-мореналық кешеннің жай-күйін бағалауда, климаттың өзгерісін, мұздықтардың кейін шегіну процестерін талдауда, апатты гидрологиялық құбылыстардың қауіптілігі мен қаупін бағалауда, сел қалыптасу жағдайларын зерттеуде, сел тасқындарын модельдеуде пайдаланылатын құрал.

Сондай-ақ, ГАЖ ортасында жер бедерінің жағдайын жедел талдау құралдары ретінде Жер бедерінің сандық моделі (ЖБСМ) және Жерді қашықтықтан зондтау (ЖҚЗ) мәліметтері пайдаланылады. Төтенше жағдайларда шешім қабылдау жүйелерінде қолданылатын мәліметтердің ерекшелігіне олардың өзектілігі, толықтығы, объективтілігі және кеңістіктік байлам жасау жылдамдығы жатады. ЖҚЗ мәліметтері зерттелетін аумақ бойынша қандай да бір уақыт аралығы үшін кеңістіктік талдау жасауға мүмкіндік берсе, ЖБСМ-нің 2D және 3D графиктері негізінде географиялық және ситуациялық мәліметтерді визуализациялау арқылы шынайы жер бедерінде кеңістіктік модельдеу және талдау мүмкіндігін қамтамасыз ететін статикалық мәліметтерді (жер бедері, жол желісі, гидрография, елді мекендер, шекаралар) алуға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта мұздықтық-мореналық кешеннің жай-күйі, оның жағдайы мен болашағын зерттеу үшін Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері шет елдерде кеңінен қолданылуда. Еліміздегі мұздықтық-мореналық кешеннің гидрометеорологиялық сипаттамаларын бақылаудың және анықтаудың қолданыстағы дәстүрлі әдістері көбінесе жер беті зерттеулері мен аэровизуалды түсірілім жұмыстарына негізделген. Жер беті зерттеулері мен аэровизуалды түсірілім жұмыстарын жүргізу қазіргі уақытта тиімсіз әдіс болып табылады, өйткені олар ауа райы жағдайына тәуелді, сонымен қатар, зерттеу кезінде үлкен аумақты қамту қиын және бақылау жүргізу барысы ұзақ уақытты, оған қоса, үлкен көлемдегі қаражатты қажет етеді (Freu et al., 2018). Сондықтан Жерді қашықтықтан зондтау және ГАЖ технологияларын пайдалану зерттелетін аумақтарды ауқымды картаға түсіру үшін дәстүрлі аэрофототүсірілімге балама болуы керек. ЖҚЗ мәліметтері арқылы бақылау әдістері аэровизуалды және жер бетілік зерттеу әдістерін жүргізу мүмкін емес жағдайларда, мысалы, жету қиын, қауіпті, шалғай орналасқан мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеу кезінде аса маңызды.

2.3 Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуын гидродинамикалық модельдеу

Гидродинамикалық модельдеу – зерттелетін жүйенің (процесс, оқиға, құбылыс) оның шартты ақпараттық көрінісімен, феноменологиялық сипаттамасымен, ұқсастық объектісімен немесе модель ретінде қабылданатын және шынайы құбылысқа тән сипаттамалармен қамтамасыз ететін басқа жүйемен алмастыру ретінде қарастыруға болады [57].

Ғаламдық деңгейдегі гидродинамикалық модельдеу жұмыстары, әдетте, апатты гидрологиялық құбылыстарды алдын ала бақылау, болжау және алдын алу мақсатында жүзеге асырылады.

Модельдеу әдетте объектілерді, процестерді, оқиғаларды немесе құбылыстарды математикалық модель арқылы сипаттайтын және қандай да бір құбылыстың шынайы сипаттамаларына жеткілікті деңгейде имитациялануын қамтамасыз ететін математикалық қатынастар жиынтығынан тұратын оңай және қолжетімді зерттеу құралы ретінде қарастырылады [57]. Кез келген математикалық модель шынайы объектіні, процессті, оқиғаны, құбылысты шындыққа белгілі бір дәрежеде жақындату арқылы сипаттайды. Математикалық модельдің түрі шынайы құбылыстың табиғатына, зерттеу міндеттері мен қолда бар ресурстарға байланысты таңдалады.

Жүйелердің сипаттамаларын және модельдерді зерттеуге арналған математикалық модельдеуді аналитикалық және имитациялық деп бөлуге болады.

Аналитикалық модельдерде күрделі жүйелердің әрекеті белгілі бір функционалдық байланыстар немесе логикалық шарттар түрінде жазылады. Оларды құру кезінде жалпы математикалық аппарат қолданылады: алгебра, функционалдық талдау, дифференциалдық теңдеулер, ықтималдықтар теориясы, математикалық статистика және т.б. Олар қандай формада құрылса да, бастапқы және соңғы шарттарды көрсетуді қажет етеді. Сондықтан күрделі жүйелер үшін аналитикалық модель әрқашан оңтайлы бола бермейді және шынайы құбылыстың тек өрескел жуықтауын ғана көрсетеді. Сол себепті, бұл жағдайда имитациялық модельдеуді қолдану қажет.

Имитациялық модельде күрделі жүйенің құрамдас бөліктерінің әрекеті алгоритмдер жиынтығымен сипатталады, содан кейін олар нақты жүйеде пайда болатын жағдайларды жүзеге асырады. Имитациялық модельдеу – компьютерлік технологияның көмегімен жүйенің жай-күйінің уақыт бойынша өзгерістерін бейнелейтін модель.

Сел тасқындарын гидродинамикалық модельдеу сандық имитациялық модельдеуге және эмпирикалық әдістерге негізделген. Көптеген сандық тәсілдер Сен-Венан теңдеулерін шешуге арналғандықтан [58], сел тасқынның биіктігі мен оның жүріп өту қашықтығын болжау үшін тиімді пайдаланылуы мүмкін. Дегенмен, қауіпті құбылыстарды инженерлік жобалауда сандық модельдерді қолдану шектеулі болып қала бермек [59]. Бұл екі маңызды мәселені тудырады. Біріншіден, қалыптасатын сел тасқыны үшін бастапқы масса мен опырылатын массаны дәл анықтау қиын. Екіншіден, белгілі бір жерде, потенциалды сел тасқынының жүріп өту аймағында оның қозғалысын

анықтайтын реологиялық параметрлерді калибрлеу үшін жүріп өткен сел тасқындарының сипаттамаларын қажет етеді [60]. Аталған мәліметтер болмаған жағдайда, сел тасқынының қозғалысын модельдеу қиынға түспек, өйткені ол қатты және сұйық массалардың салыстырмалы мөлшеріне тәуелді.

Зерттеу аумағында мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде қалыптасқан сел тасқынының жүріп өту жолындағы параметрлерін, соның ішінде сел тасқынының биіктігі, жылдамдығы, қысымы, моменті, олардың максималды мәні, бос сынықты материалдардың (эрозия) көлемі, оның шөгу аймағы және максималды мәндерін анықтау мақсатында RAMMS бағдарламасы барынша тиімді болып саналады. Бұл модель геофизикалық массалық қозғалыстардың бастауынан тоқтауына дейінгі динамикасын түсінуге, сондай-ақ күрделі жер бедеріндегі апатты қозғалыстардың жылдамдығы мен ұзақтығын болжауға мүмкіндік береді [61]. Аталған апатты қозғалыстарға қар көшкіндері, сел тасқындары, еңістіктік сел тасқындары, жылжымалар, сырғымалар, қорымдар мен тас құламалар жатады. Сонымен қатар, аталған модель ЖБСМ адаптациялауға, ЖБСМ-не бос сынықты материалдар қабаты мен селден қорғану бөгетін қосуға, сел тасқынын талдауға (масса қозғалысының нәтижелері) және сел тасқынының сызықтық профилі мен уақыттық графиктерін алуға мүмкіндік береді.

RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) – үш өлшемді жер бедеріндегі геофизикалық массалық қозғалыстардың (қар көшкіні, сел тасқыны, жылжыма, сырғыма құбылыстары) қалыптасуынан бастап, жүріп өтуі және жайылып, тоқтауына дейінгі қозғалысын есептеуге арналған заманауи сандық модель [61].

RAMMS моделі «WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF» ғылыми институтының (Швейцария, Давос) мамандарымен әзірленген.

RAMMS моделі арқылы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуын гидродинамикалық модельдеу үшін жер бедерінің сандық моделі (ЖБСМ), ақтарылу аймағы немесе гидрографы, ақтарылған су көлемі және үйкеліс параметрлері туралы мәліметтер енгізілді. Сонымен қатар, гидродинамикалық модельдеу үшін мұздықтық-мореналық көлдің көлемі, ақтарылған жағдайда оны өтімі, жылдамдығы, ақтарылу бұрышы, эрозияға ұшырайтын тереңдігі, эрозия типі көрсетілді.

Зерттеу ауданының ЖБСМ сел тасқынын модельдеу үшін ең маңызды енгізу талабы болып табылады. Модельдеу нәтижелері топографиялық кіріс мәліметтерінің кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі мен дәлдігіне тікелей тәуелді. RAMMS келесі топографиялық мәліметтерді өңдей алады [61]:

- Кеңістіктік мәліметтер ASCII X,Y,Z
- ESRI номенклатурасындағы ASCII

RAMMS ESRI ASCII торындағы топографиялық мәліметтерді қажет ететіндіктен, ASCII X, Y, Z мәліметтерін RAMMS жүйесінде ESRI ASCII торына түрлендіруге болады. RAMMS бағдарламасында ЖБСМ мәліметтерінің басқа түрлерін өңдеу мүмкін емес.

Келесі ретте, мұздықтық-мореналық көлдің ақтарылу симуляцияның бастапқы шарттарын анықтау қажет. Оның екі түрін ажыратуға болады:

- Ақтарылу аймағы (немесе блокты босату)
- Кіріс гидрографы (немесе қарапайым гидрограф)

Мұздықтық-мореналық көлдің ақтарылуын модельдеу үшін кіріс гидрографын пайдаланған жөн. Ол үшін бастапқы мәлімет ретінде ақтарылатын мұздықтық-мореналық көлдің көлемі және тереңдігі жөнінде ақпарат болу керек.

Модельдеу үшін аса маңызды параметрлердің бірі үйкеліс мәндері. RAMMS Вельми-Сальма тәсіліне негізделген Вельми сұйық үйкеліс моделін пайдаланады [62]. Үйкеліс параметрлерін таңдау далалық зерттеу мәліметтеріне, сел тасқынының жүріп өту аймақтарының фотосуреттеріне, сел тасқынының жылдамдығы мен биіктігін бағалау немесе өлшеу және бос сынықты материал құрамын бағалау сияқты анықтамалық мәліметтерге сүйене отырып, модельді мұқият калибрлеуді талап етеді [63].

Вельмидің үйкеліс заңы үйкеліс кедергісін екі бөлікке бөледі: құрғақ кулондық үйкеліс (μ коэффициенті), ол қалыпты кернеумен және квадраттық кедергімен немесе тұтқыр-турбулентті үйкеліспен (ξ коэффициенті) масштабталады. Үйкеліс кедергісі S (Pa) келесідей өрнектеледі (1):

$$S = \mu \rho H g \cos(\varphi) \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (1)$$

мұндағы ρ - тығыздық, g - гравитациялық үдеу, φ - көлбеу бұрыш, H - ағынның биіктігі және U - ағынның жылдамдығы. Жүріп өту жолындағы $\rho H g \cos(\varphi)$ қалыпты кернеуін бір N параметріне дейін азайтуға болады. Вельми моделі қатты фазаның кедергісін (μ кейде ішкі ығысу бұрышының тангенсі ретінде көрсетіледі) және тұтқыр немесе турбулентті сұйықтық фазасын (ξ гидродинамикалық аргументтерді пайдалана отырып Вельми енгізген) ескереді. Үйкеліс коэффициенттері ағынның қозғалыс жолындағы әрекетін айқындайды. Атап айтқанда, μ мәндері ағын тоқтауға жақын болғанда жоғары болса, ξ мәндері ағын жылдам қозғалғанда жоғары болады.

Сел тасқыны қатты құраушыларының алуантүрлілігі үйкеліс параметрлерін таңдау және модельдеу кезінде қиындық тудырады. RAMMS::Debris Flow бір фазалы модельді пайдаланады, сондықтан сұйық және қатты фазаларды ажырату мүмкін емес, ал бос сынықты материал көлемді ағын ретінде модельденеді. Сондықтан, үйкеліс параметрлері байқалатын ағын қасиеттеріне (модельді калибрлеу үшін) немесе күтілетін ағын қасиеттеріне (егер өзгеріс қауіп сценарийінің бөлігі ретінде күтілсе) сәйкес өзгеруі керек.

Модельдеу барысында Вельми үйкеліс коэффициенттерін (құрғақ кулондық үйкеліс μ және ξ тұтқыр-турбулентті үйкеліс) табу үшін калибрлеу процедурасы жүргізіледі. Соның негізінде μ және ξ мәндері таңдалады.

RAMMS моделінде күрделі процесті кешенді бағалау үшін кіші (ықтималдығы жоғары), орташа (ықтималдығы орташа) және үлкен

(ықтималдығы төмен) сценарийлерді қарастырылуы қажет. Бұл сценарийлер бір-бірінен зерттеу ауданындағы бос сынықты материалдардың жай-күйі мен құрамы, эрозияның қазу тереңдігі және ылғалдылығы бойынша ажыратылды.

Барлық үш сценарий үшін бүкіл процесс тізбегі модельденгеннен кейін сел тасқынын қарқындылығы бойынша жіктеуге, қауіптілік деңгейлерін қарқындылық-ықтималдылық матрицаларына сәйкес көрсетуге, және модель нәтижелері негізінде арна маңы бойынша сел тасқынының қауіптілік картасын жасауға болады.

Швейцария мемлекетінде RAMMS моделі негізінде жасалған қауіптілік карталары далалық зерттеу мәліметтерін ескере отырып, қауіптілік деңгейі бойынша әзірленген жіктемелер жергілікті әкімшілік жүйесімен түзетіледі. Бұл жалпы бағалау құрылымын жергілікті мекемелерге енгізу үшін қалай өзгертуге және оңтайландыруға болатынын көрсетіп ғана қоймай, тек модельдеу нәтижелері апатты құбылыстардың алдын алу және салдарын төмендету стратегияларын әзірлеу үшін жеткіліксіз екенін растайды [58].

RAMMS моделінің басқа гидродинамикалық модельдерден (MSF, FLO-2D, BASEMENT, Titan2D, IBER, g.avafLOW, LAHRAZ, Rockyfor3D) артықшылығы ретінде сел тасқынын модельдеуге қажетті барлық кіріс параметрлерімен қамтылуын айтуға болады. Мысалы, MSF моделі үшін тек ЖБСМ бастапқы зонасы, FLO-2D үшін ЖБСМ, үйкеліс параметрлері, жылдамдық мен тереңдік мәндері, BASEMENT үшін тек ЖБСМ, Titan2D үшін топографиялық мәліметтер, ағын мен кедір-бұдырлық жөнінде мәліметтер, IBER үшін батиметрия және массалық қозғалыс әсерінің гидрографиясы, g.avafLOW үшін ЖБСМ, үйкеліс параметрлері, бастапқы жағдайлар, LAHRAZ үшін топография және көлем бойынша сценарийлер сияқты кіріс параметрлерді қажет етеді [61]. Алайда, бұл бағдарламаның кемшілігі ретінде қолжетімсіздігін айтуға болады. Жоғарыда көрсетілген модельдердің барлығы интернет-ресурстарында қолжетімді болса, RAMMS бағдарламасы арнайы лицензияны қажет етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыстың екінші тарауында зерттеу барысында қолданылатын негізгі зерттеу әдістері сипатталды. Зерттеу ауданында жүргізілген далалық зерттеулердің нәтижесінде қол жеткізілетін мәліметтерге талдау жасалды. Талдау нәтижесінде жер беті зерттеу әдістері мүмкін емес жағдайларда, мысалы, жетуі қиын, қауіпті, шалғай орналасқан мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеу үшін ЖҚЗ мәліметтерін пайдалану мүмкіндіктері сипатталды. ГАЖ технологиялары және Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтерін пайдаланудың бірқатар артықшылықтары мен өрісті жолдары бағаланды.

ЖҚЗ мәліметтерін және ГАЖ технологияларын пайдалану арқылы зерттеу ауданын кеңістіктік бақылауға, кеңістіктік мәліметтерді талдауға мүмкіндік беретіні айқындалды. Бұл әдістер үлкен аудандардағы уақыттық өзгерістерді және олардың жай-күйі туралы ақпарат алуға, зерттелетін объектілердің гидрометеорологиялық сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік беретіндігі түсіндірілді.

Гидродинамикалық модельдеу гидрологиялық процестерді болжау мен талдаудың маңызды құралы ретінде сипатталды. Апатты гидрологиялық құбылыстың қалыптасуына және апаттылық дәрежесіне әсер ететін параметрлер келтірілді.

Талдау нәтижелері зерттеу объектісінің әртүрлі аспектілері арасындағы маңызды заңдылықтар мен байланыстарды анықтады, бұл болашақта осы объектіні басқару бойынша ұсыныстар мен стратегияларды әзірлеуге негіз болады.

Қорытындылай келе, екінші тарауда Іле алаатауының орталық бөлігінде орналасқан Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарының потенциалды қауіптілігін бағалау және зоналау үшін пайдалануға болатын зерттеу әдістері және олардың мүмкіндіктері, артықшылықтары түсіндірілді.

3 ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ОРТАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ ЖАЙ-КҮЙІ

3.1 Іле алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары

Іле Алатауының солтүстік беткейінде 1960 жж. басында көлемі 10 мың м³ асатын көлдер саны 10 шақты болса, 1980 жж. олардың саны 41-ге жеткен, ал 1990 жылға қарай олардың саны 60-қа, 2000 жылы 100 асқан. [64]. «Қазселденқорғау» ММ мәліметтері бойынша 2023 жылы мұздықтық-мореналық көлдердің жалпы саны 187 құрады, бұл жыл сайын 4-5 жаңа көлдердің пайда болып жатқандығын көрсетеді. Мұздықтық-мореналық көлдер санының қарқынды өсуі және олардың дамуы жүйелі бақылау жұмыстарын жүргізуді қажет етті. Климаттың ғаламдық жылынуы жағдайындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін бағалау үшін олардың морфометриялық сипаттамалары бойынша нақты және жинақталған мәліметтер жиынтығына қажеттілік туындап, оларды түбегейлі зерттеу, батиметриялық жұмыстар жүйелі түрде жүргізіле бастады. Батиметриялық өлшеулер негізінде мұздықтық-мореналық көл қазаншұңқырларының типі, көлдердің ұзындығы (L , м), орташа ені (B , м), максималды және орташа тереңдігі ($h_{\text{макс}}$, $h_{\text{орт}}$, м), су айдынының ауданы (F , мың.м²), су массасының көлемі (W , мың.м³), көл байламының ұзындығы мен ені (L , м), еңістігі (i , °), байламның минималды биіктігі (H , м) бойынша мәндерге қол жеткізіледі.

Қазақстанда қазіргі кезде жалпы саны 970 мұздықтық-мореналық көл бар. Оның басым бөлігі, атап айтқанда, 187 көл Іле Алатауына тиесілі. Іле Алатауының орталық бөлігі мұздықтық-мореналық көлдерге қатысты салыстырмалы түрде жақсы зерттелген. Мұздықтық-мореналық көлдерді ең алғашқы құжаттау жұмыстары 1975 жылдардың басында жүргізілген. Құжаттау нәтижесінде Үлкен Алматы өзен алабында 11 мұздықтық-мореналық көл, олардың ішінде ақтарылу қауіптілігі жоғары 5 көл анықталған. Олар: №1, №1-бис (ақтарылу қауіптілігі аса жоғары), №2, №9, №9-бис (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №10 (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №11 (ақтарылу қауіптілігі аса жоғары), №12, №12-бис, №13 (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №15 көлдер. Негізінен мұздықтық-мореналық көлдердің шығу тегі мореналық болып табылады және қазаншұңқырлары мұз маңында қалыптасқан. Көлдердің байламдары негізінен орташа мөлшердегі сынықты тау жыныстарынан тұрады. Мұздықтық-мореналық көлдер абсолютті биіктігі 3400-3600 м аралығындағы биік таулы зонада кездеседі. Олардың су айдынының ауданы 1500-40000 м² аралығын құраса, көлемі 1 мың мен 230 мың м³ аралығын қамтиды. Ал көлдердің орташа тереңдігі 2-6 м, максималды тереңдігі 7-18 м аралығын құрайды.

Құжаттау мәліметтеріне сәйкес, Кіші Алматы өзен алабында 8 мұздықтық-мореналық көл, соның ішінде ақтарылу қауіптілігі жоғары 3 көл

тіркелген. Оларға №1, №2 (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №3 (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №4, №5, №5а (ақтарылу қауіптілігі жоғары), №6, №7 көлдері жатады. Көлдер абсолютті биіктігі 3300-3600 м аралығын қамтитын биік таулы зонада орналасқан. Барлық көлдердің қазаншұңқырлары мореналық деп белгіленген. Су айдынының ауданы 700-12000 м², көлемі 300 м³ мен 45 мың м³ аралығын, орташа тереңдігі 0,5-7,8 м аралығын, максималды тереңдігі 2-16 м аралығын құрады.

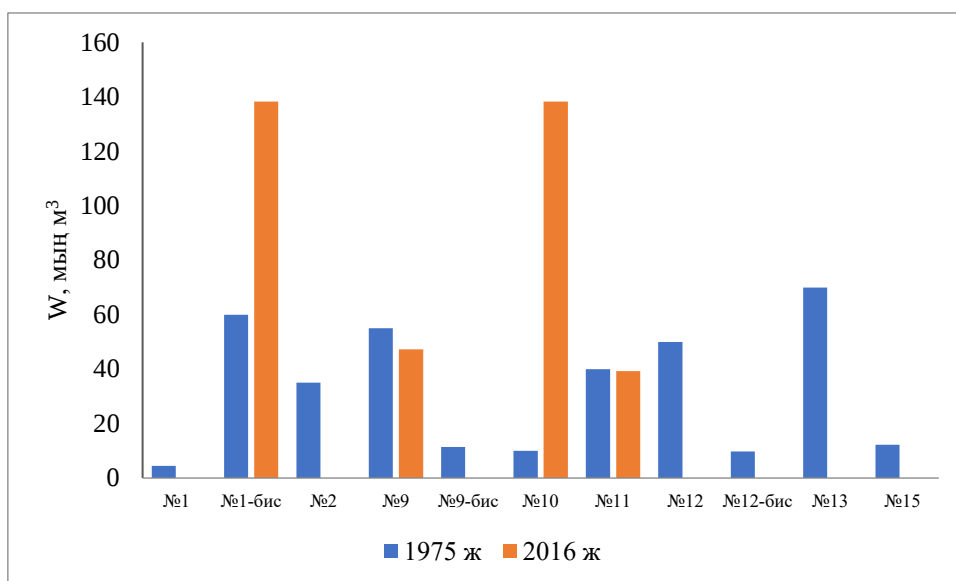
Аталған көлдер үшін, олардың қазаншұңқырлары тоңдық топырақта орналасқандықтан, моренаішілік қуыстармен жалғаса отырып, моренаның беткейлеріне жететін көластында жібiген тоңдардың қалыптасуы тән [65]. Бұл кейде аса ылғалданған мореналық топырақтың опырылуына, содан кейін сел тасқынының пайда болуына әкелуі мүмкін.

Тоңды морена аймақтарындағы моренаішілік ағынды топырақтардың босаңсуына және еріген массивтердің қалыптасуына алып келеді. Қалған аймақтардың аса ылғалдануы және еріген мореналардың қабаттарынан майда көлдік жыныстардың шығуы оның опырылуына әкелуі мүмкін. Көмілген мұз аймақтарындағы моренаішілік ағынды грот түрінде шоғырланған ағынды арналарының пайда болуына және моренадағы елеулі қуыстардың дамуына әкеледі. Күмбездердің құлауы кезінде гроттардың жабылуы және қуыстардың еріген сулармен толтырылуы моренаның опырылуына жағдай жасайды. 1978 ж. мәліметтер бойынша №4, №5, №5а көлдері су қорымен мүлдем толыспаған. Мұның себебі, маусым айынан бастап №5а көлінде жиналған барлық су қоры моренаға кететін грот арқылы №4 және №5 көлдерінің арасындағы мұздық байламның еруінен №3 көліне қарай транзитпен өткен. Сонымен қатар, бұл жерде моренаішілік ағынды жолдарының өзгеруі байқалып отырған. Орталық Тұйықсу мұздығының еріген суы №4 және №5 көлдеріне құймай, моренаішілік каналдар арқылы моренаға тереңдей түскен. Сол себепті, №2 және №3 көлдері лайланып, қазаншұңқырларының босаңсыған. Тұйықсу және Молодежный мұздықтарынан пайда болатын ағынды №2 мен №3 көлдерінен өтіп, термокарст қазаншұңқырына бағытталған. Мұздықтық-мореналық көлдер туралы кешенді зерттеулер араға 40 жылға жуық уақыт салып, қайта жанданды.

Мұздықтардың қарқынды кейін шегінуі биік таулы аумақтағы мұздықтық-мореналық көлдерді есепке алу, олардың морфометриялық сипаттамалары туралы мәліметтерді жаңарту қажеттігін туындатты. Осыған орай, 2016 жылы «Қазселденқорғау» ММ мамандары арқылы Іле Алатауындағы Үлкен және Кіші Алматы өзендері алаптарындағы ақтарылу қаупі жоғары мұздықтық-мореналық көлдерге батиметриялық өлшеу жұмыстары жүргізілді.

Зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдер көлемінің өзгеру динамикасын талдау мақсатында 1975 және 2016 жж. жүргізілген батиметриялық өлшеулер нәтижелері салыстырылды. 1975 ж. зерттеу нәтижелері бойынша №1 мұздықтық-мореналық көлінің көлемі 4,5 мың м³ құраған, алайда, 2016 ж. мәліметтері бойынша мұндай нөмірдегі көл жоқ. №1-

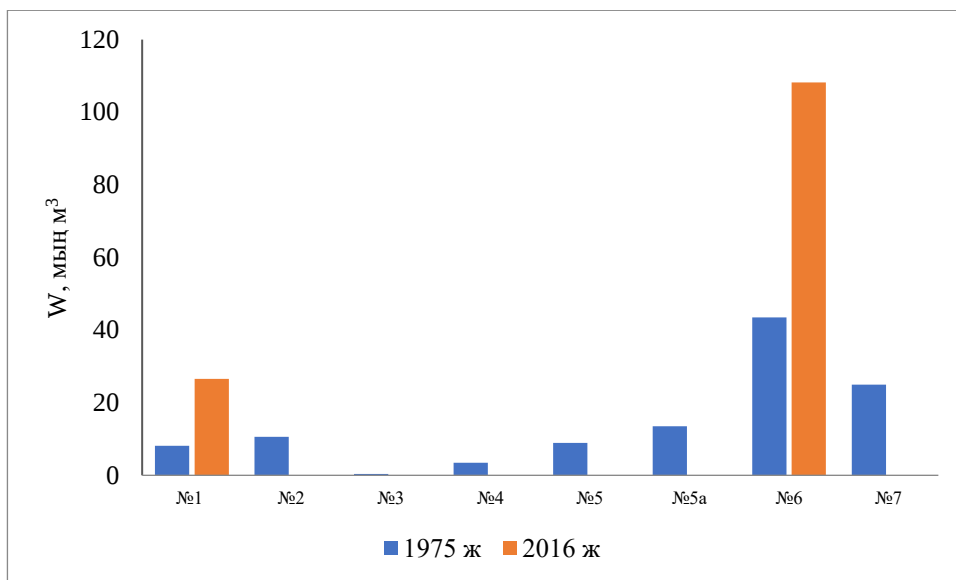
бис көлінің су көлемі 1975 жылы 60 мың м³ болса, 2016 жылы 138,3 мың м³, (130%) өскен. Сондай-ақ №10 көлдегі су көлемі 14 есе артты. Ал, №9, №11 мұздықтық-мореналық көлдерінің көлемі 2016 жылы 1975 жылмен салыстырғанда мардымсыз азайған (5-сурет).



Сурет 5 – Үлкен Алматы өзен алабы бойынша 1975 және 2016 жж. батиметриялық өлшеулер негізінде есептелген мұздықтық-мореналық көлдердің көлемі, мың м³

Кіші Алматы өзені алабында 2016 жүргізілген батиметриялық өлшеулер 6 мұздықтық-мореналық көлде (№1, №1а, №2, №3, №6, №7) жүргізілді. Олардың ішінде 2 көл ақтарылу қауіптілігі жоғары деп танылды.

6-суретте Кіші Алматы өзен алабының мұздықтық-мореналық көлдерінің 1975 және 2016 жылдарда жүргізілген батиметриялық түсірілімдер нәтижесінде алынған судың көлемі берілген. №1 көлдегі су көлемі 8,1-ден 26,6 мың м³-ке дейін (228%), №6 мореналық көлінің көлемі 43,5-тен 108,2 мың м³-ке дейін (148%) артқан. Ал соңғы зерттеу нәтижелері бойынша №2, №3 көлдерінің қазаншұңқырлары бос және №4, №5, №5а көлдері құжатталмаған, №7 көлінде ақтарылу қауіптілігі болмағандықтан батиметриялық жұмыстар жүргізілмеген.



Сурет 6 - Кіші Алматы өзен алабы бойынша 1975 және 2016 жж. батиметриялық өлшеулер негізінде есептелген мұздықтық-мореналық көлдердің көлемі, мың м³

2020 жылы Google Earth App бағдарламасы негізінде Іле Алатауының орталық бөлігіндегі Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарының мұздықтық-мореналық кешеніндегі көлдер саны анықталды. Сондай-ақ, аталған бағдарлама арқылы ақтарылу қаупі бар көлдердің ауданын анықтауға талпыныс жасалды. Құжаттау нәтижесі бойынша Үлкен Алматы өзен алабында барлығы 18 мұздықтық-мореналық көл анықталды. Оларға №1-бис «Проходная», №2, №3, №4, №5, №6, №7, №8 №9a, №9 «Озерная», №10, №11, №12, №13, №13-бис, №14, №15, №16 нөмірлері берілді. Олардың ішінде 6 көл ақтарылу қауіптілігі жоғары көлдер санатына жатқызылды. Көлдердің орналасуы биік таулы аймақтың абсолютті биіктігі 3400-3900 м аралығын қамтыды.

Кіші Алматы өзен алабында 6 (№1, №1a, №2, №3, №6, №7) мұздықтық-мореналық көл құжатталды, олардың 2 ақтарылу қауіптілігі жоғары болды. Мұздықтық-мореналық көлдер абсолютті биіктігі 3300-3600 м аралығын қамтитын биік таулы зонада орналасқан.

«Қазселденқорғау» ММ құжаттау нәтижелері зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің орны, саны және ақтарылу қауіптілігінің жай-күйі жөнінде толыққанды мағлұмат бергенімен, мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары жөнінде нақты және сенімді мәліметтер бере алмады. Сол себепті, Іле Алатауының орталық бөлігінде орналасқан Үлкен және Кіші Алматы өзені алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау мақсатында қашықтықтан зондтау мәліметтері мен ГАЗ технологияларын қолдану арқылы құжаттау жұмыстарын толықтыру керек. Сондай-ақ зерттеу барысында мұздықтық-мореналық көл қазаншұңқырының уақыттық өзгеруі, мұздықтық-мореналық көлдердің саны мен ауданы, мұздықтардың кейін шегіну қарқындылығы бойынша морфометриялық сипаттамалар жаңартылуы керек және ЖҚЗ мәліметтеріне қойылатын

талаптарға сай, сондай-ақ арнайы түзетулер мен өңдеу жұмыстарының нәтижесінде орындалғандығы жөн.

Осы орайда, мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары бойынша сенімді ақпарат алу үшін USGS Earth Explorer [66] базасынан алынған Multispectral Scanner System (MSS), Thematic Mapper (TM), Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus (TM/ETM+) Landsat, Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдері өңделді (1-кесте).

Кесте 1. Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын анықтауда қолданылған мәлімет көздері

Ғарыштық жерсерік	Түсірілімнің жарияланған уақыты	Ғарыштық суреттің идентификаторы	Мәліметте көзі	Кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі
Landsat 2	07.29.1978	LM02_L1TP_161030_19780729_20200906_02_T2	USGS	60 m
Landsat 5	07.08.1990	LT05_L2SP_149030_19900807_20200915_02_T1	USGS	30 m
Landsat 7	08.08.1999	LE07_L2SP_149030_19990808_20200918_02_T1	USGS	30 m
Landsat 8	06.08.2013	LC08_L2SP_149030_20130806_20200912_02_T1	USGS	30 m
Sentinel-2	24.07.2021	S2A_MSIL2A_20210724T054641_N0301_R048_T43TFH_20210724T080202	COAH	15 m

Бүгінгі таңда су объектілерін анықтау және олардың морфометриялық сипаттамаларын нақтылау үшін мультиспектрлік кескіндер және NDWI индексі қолданылады. Ғарыштық суреттер жинағы зерттеу аумағының жай-күйі және зерттеу объектілерінің морфометриялық сипаттамалары туралы сенімді ақпарат алуға мүмкіндік береді.

Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын зерттеу мультиспектралды мәліметтерді біріктіру, су бетінің индексін пайдалану арқылы ЖКЗ мәліметтерінің негізінде жүзеге асырылады. Сондай-ақ, олардың негізінде мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларының уақыттық өзгерістерін талдауға да болады [67], [68], [69].

Зерттеудің мақсаты мен міндеттеріне қол жеткізу үшін, атап айтқанда Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің соңғы онжылдықтардағы (1990-2021) өзгерістерін бағалау үшін барлығы 30-ға жуық ғарыштық түсірілімдер өңдеуден өткізілді. Өңдеу

барысында Corona Imagery арқылы түсірілген ғарыштық сурет (06.01.1970) дешифрленді. Бірақ бұл суреттерді географиялық координаттар жүйесіне байлам жасау қиынға соқты және барлық аумақты қамтыған жоқ. Landsat-2 суреттерінің ішінде 09.07.1975, 08.08.1976, 26.08.1976, 29.07.1978, 16.08.1978 күндері үшін түсірілген ғарыштық суреттер дешифрленді. Келесі онжылдықта Landsat-5 ғарыштық суреттері бойынша 20.08.1989, 08.07.1990, 15.08.1993, 07.01.1994, 23.08.1996 күндерінде, 2000-2010 жылдар аралығындағы Landsat 7 суреттері бойынша 08.08.1999, 08.15.1999, 07.09.2000, 26.08.2000, 15.07.2002, 18.07.2003, 18.06.2004., 07.06.2004, 21.06.2005 және Landsat 8 суреттері бойынша 22.08.2010, 08.06.2013, 08.09.2014, 20.08.2015 күндерінде түсірілген ғарыштық суреттер дешифрленді. Дешифрлеу нәтижелері бойынша бұлт және қар қабаттарының минималды шегімен және түсірілімнің жоғары сапасымен ерекшеленген ғарыштық түсірілімдер таңдалып алынды. Сонымен қатар, 1970 жж. ғарыштық суреттері бойынша қателіктер жоғары болғандықтан, зерттеу ауданы үшін морфометриялық сипаттамалар 1990-2021 жж. аралығы бойынша анықталды.

Зерттеу барысында қар қорының минималды шегі байқалатын, салыстырмалы түрде құрғақ маусым болып табылатын және мұздықтық-мореналық көлдердің су айдыны толықтай қар мен мұздан арылатын шілде-тамыз айларындағы ғарыштық түсірілімдер алынды.

Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриясы геоморфологияның бір бөлігі ретінде және көл қазаншұңқырының пішіндері мен өлшемдері, оларды алып жатқан су көлемін сандық сипаттауға арналған көл туралы ғылымның бір саласы ретінде қарастырылады. Морфометриялық сипаттамалар лимнологиялық және гидробиологиялық зерттеулерді жүргізу үшін аса маңызды көрсеткіш болып табылады. Көлдердің негізгі морфометриялық сипаттамалары және оларды анықтау әдістері Г.Ю. Верещагиннің [70] зерттеулерінде көрсетілген, солардың ішінде, лимнологиялық және гидробиологиялық зерттеулерде 10-нан 30-ға жуық сипаттамалар кеңінен қолданылған.

Сол себепті, мұздықтық-мореналық көлдердің конфигурациясын сипаттау үшін зерттеу барысында лимнологияда кеңінен қолданылатын морфометриялық сипаттамалардың мәндері анықталды [71]. Олар: ауданы (A , m^2), ұзындығы (L , m), ені (B , m), орташа ені ($B_{орт}$, m), жаға сызығы ұзындығы (K , m), жаға сызығының дамуы (K_i), орташа тереңдігі (D , m), көлемі (V , m^3), созыңқылық көрсеткіші ($K_{созың}$), жинақылық көрсеткіші ($K_{жинақ}$), жаға сызығының дамуының көрсеткіші ($K_{жаға}$). Көлдердің таңдалып алынған морфометриялық сипаттамалары бойынша анықталған мәндер 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары бойынша мұздықтық-мореналық көлдердің 1990-2021 жж. аралығындағы морфометриялық сипаттамалары

№	Жыл	Ауданы , м² (А)	Ұзындығы, м (L)	Ені, м (B)	Орта ша Ені, м (Ворт =A/L)	Жаға сызығы ұзындығы, м (K)	Жаға сызығының дамуы (Kі= 0.28(L/√A)	K _{жаға} =L/ А	K _{созың} = L/ В _{орт}	K _{жиілік} = Ворт/В	Көлемі, м³ (V)	Орташа Тереңдігі, м (D=V/A)
Үлкен Алматы өзені алабы бойынша												
1	1990	10000	175	76	57	415	0.49	0.042	3.1	0.75	33101	3.3
	1999	4600	108	61	43	277	0.45	0.060	2.5	0.70	12156	2.6
	2013	8500	403	60	21	163	1.22	0.019	19.1	0.35	26840	3.2
	2021	13500	473	163	29	473	1.14	0.035	16.6	0.18	48749	3.6
	Δ1990↑ 2021	↑3500	↑298	↑87	↓29	↑58	↑0.65	↓0.01	↑13.51	0.58	↑15648	↑0.30
2	1990	1850	68	30	27	182	0.44	0.10	2.50	0.91	3754	2.03
	1999	3150	84	60	38	223	0.42	0.07	2.24	0.63	7459	2.37
	2013	20320	255	115	80	600	0.50	0.03	3.20	0.69	82615	4.07
	2021	14200	274	80	52	633	0.64	0.04	5.29	0.65	52034	3.66
	Δ1990↑ 2021	↑12350	↑206	↑50	↑25	↑451	↑0.20	↓0.05	↑2.79	↓0.26	↑48280	↑1.64
3	1990	4000	108	53	37	258	0.48	0.06	2.92	0.70	10151	2.54
	1999	1900	71	32	27	184	0.46	0.10	2.65	0.84	3885	2.04
	2013	935	44	30	21	122	0.40	0.13	2.07	0.71	1557	1.66
	2021											
4	1990	13100	170	120	77	440	0.42	0.03	2.21	0.64	46894	3.58
	1999	22960	192	150	120	562	0.35	0.02	1.61	0.80	96714	4.21
	2013	23900	202	150	118	578	0.37	0.02	1.71	0.79	101852	4.26
	2021	21700	150	170	145	580	0.29	0.03	1.04	0.85	89923	4.14
	Δ1990↑ 2021	↑8600	↓20	↑50	↑68	↑140	↓0.13	↓0.01	↓1.17	↑0.21	↑43029	↑0.56
5	1990	8100	123	90	66	338	0.38	0.04	1.87	0.73	25222	3.11
	1999											
	2013											
	2021											
6	1990	1850	68	30	27	182	0.44	0.10	2.50	0.91	3754	2.03
	1999	1870	69	31	27	183	0.45	0.10	2.55	0.87	3806	2.04
	2013	3205	86	60	37	224	0.43	0.07	2.31	0.62	7627	2.38
	2021	1000	64	22	16	147	0.57	0.15	4.10	0.71	1698	1.70
	Δ1990↑ 2021	↓850	4	8	12	35	↑0.12	↑0.05	↑1.60	0.20	2056	0.33
7	1990	4950	108	60	46	282	0.43	0.06	2.36	0.76	13362	2.70
	1999	3670	60	87	61	242	0.28	0.07	0.98	0.70	9084	2.48
	2013	922	44	31	21	121	0.41	0.13	2.10	0.68	1529	1.66
	2021	4300	112	61	38	304	0.48	0.07	2.92	0.63	11143	2.59
	Δ1990↑ 2021	↓650	↑4	↑1	7	↑22	↑0.05	↑0.01	↑0.56	↓0.13	↓2219	↓0.11
8	1990	3200	85	60	38	223	0.42	0.07	2.26	0.63	7612	2.38
	1999	11800	127	111	93	395	0.33	0.03	1.37	0.84	40979	3.47
	2013	59000	343	241	172	962	0.40	0.02	1.99	0.71	326764	5.54
	2021	54900	378	210	145	970	0.45	0.02	2.60	0.69	297772	5.42
	Δ1990↑ 2021	↑51700	↑293	↑150	↑108	↑747	↑0.03	↓0.05	↑0.34	↑0.06	↑290160	↑3.05
9	1990	9425	173	80	54	413	0.50	0.04	3.18	0.68	30666	3.25
	1999											

	2013											
	2021											
10	1990	4400	102	60	43	260	0.43	0.06	2.36	0.72	11479	2.61
	1999	1050	46	33	23	127	0.40	0.12	2.02	0.69	1808	1.72
	2013	4070	109	53	37	260	0.48	0.06	2.92	0.70	10380	2.55
	2021	3190	85	60	38	224	0.42	0.07	2.26	0.63	7581	2.38
	Δ1990↑ 2021	↓1210	↓17	↓0	↓6	↓36	↓0.01	↑0.01	↓0.10	↓0.09	↓3898	↓0.23
11	1990	1850	69	31	27	183	0.45	0.10	2.57	0.86	3754	2.03
	1999											
	2013											
	2021	910	43	30	21	120	0.40	0.13	2.03	0.71	1503	1.65
	Δ1990↑ 2021	↓940	↓26	↓1	↓6	↓63	↓0.05	↑0.03	↓0.54	↓0.16	↓2251	↓0.38
12	1990											
	1999	3200	85	60	38	223	0.42	0.07	2.26	0.63	7612	2.38
	2013	20300	255	115	80	600	0.50	0.03	3.20	0.69	82510	4.06
	2021	14200	257	112	55	603	0.60	0.04	4.65	0.49	52034	3.66
	Δ1999↑ 2021	↑11000	↑172	↑52	↑18	↑380	↑0.18	↓0.03	↑2.39	↓0.13	↑44422	↑1.29
13	1990											
	1999	6090	131	80	46	325	0.47	0.05	2.82	0.58	17458	2.87
	2013	15900	193	121	82	489	0.43	0.03	2.34	0.68	60206	3.79
	2021	8900	149	90	60	382	0.44	0.04	2.49	0.66	28481	3.20
	Δ1999↑ 2021	↑2810	↑18	↑10	↑13	↑57	↓0.03	↓0.01	↓0.32	↑0.08	↑11023	↑0.33
14	1990											
	1999											
	2013	2700	86	43	31	207	0.46	0.08	2.74	0.73	6114	2.26
	2021	4100	107	58	38	257	0.47	0.06	2.79	0.66	10479	2.56
	Δ2013↑ 2021	↑1400	↑21	↑15	↑7	↑50	0.00	0.01	↑0.05	0.07	↑4366	↑0.29
15	2021	11400	184	90	62	473	0.48	0.04	2.97	0.69	39196	3.44
16	2021	3200	70	63	46	211	0.35	0.07	1.53	0.73	7612	2.38
17	2021	1950	67	44	29	175	0.42	0.09	2.30	0.66	4018	2.06
18	2021	5300	113	68	47	293	0.43	0.06	2.41	0.69	14593	2.75
19	2021	1050	30	41	35	122	0.26	0.12	0.86	0.85	1808	1.72
20	2021	1800	51	41	35	161	0.34	0.09	1.45	0.86	3624	2.01
21	2021	2100	67	30	31	180	0.41	0.09	2.14	1.04	4421	2.11
22	2021	1300	68	22	19	160	0.53	0.12	3.56	0.87	2381	1.83
23	2021	1700	40	50	43	155	0.27	0.09	0.94	0.85	3366	1.98
24	2021	1190	58	28	21	141	0.47	0.12	2.83	0.73	2125	1.79

Кіші Алматы өзені алабы бойынша												
1	1990	1770	67	31	26	178	0.45	0.10	2.54	0.85	3546	2.00
	1999											
	2013											
	2021											
2	1990	6850	128	81	54	322	0.43	0.05	2.39	0.66	20318	2.97
	1999	5910	127	65	47	308	0.46	0.05	2.73	0.72	16795	2.84
	2013	5860	128	64	46	308	0.47	0.05	2.80	0.72	16612	2.83
	2021	3300	106	42	31	246	0.52	0.07	3.40	0.74	7920	2.40
	Δ1990↑ 2021	↓3550	↓22	↓39	↓22	↓76	↑0.08	↑0.03	↑1.01	↑0.08	↓12398	↓0.57
3	1990	11750	153	90	77	410	0.40	0.03	1.99	0.85	40755	3.47
	1999	21230	217	142	98	559	0.42	0.03	2.22	0.69	87418	4.12
	2013	22500	233	149	97	588	0.43	0.03	2.41	0.65	94222	4.19
	2021	11900	151	107	79	410	0.39	0.03	1.92	0.74	41428	3.48
	Δ1990↑ 2021	↑150	↓2	↑17	↓2	0	↓0.01	↓0.00	↓0.08	↓0.12	↑672	↑0.01
4	1990	3300	86	61	38	227	0.42	0.07	2.24	0.63	7920	2.40
	1999	6900	109	91	63	323	0.37	0.05	1.72	0.70	20509	2.97
	2013	11443	152	107	75	408	0.40	0.04	2.02	0.70	39387	3.44
	2021	9750	126	90	77	351	0.36	0.04	1.63	0.86	32037	3.29
	Δ1990↑ 2021	↑6450	↑40	↑29	↑39	↑124	↓0.06	↓0.03	↓0.61	↑0.23	↑24117	↑0.89
5	1990											
	1999											
	2013	2700	86	42	31	206	0.46	0.076	2.7	0.75	6114	2.3
	2021	3200	105	43	30	258	0.52	0.081	3.4	0.71	7612	2.4
	Δ2013↑ 2021	↑500	↑19	↑1	↓1	↑52	↑0.06	↓0.00	↑0.71	↓0.04	↑1498	↑0.11
6	2021	500	50	10	10	121	0.63	0.242	5.0	1	694	1.4

Ескерту: - мұздықтық-мореналық көлдің жойылғандығын білдіреді
 - мұздықтық-мореналық көлдің жаңадан пайда болғандығын білдіреді

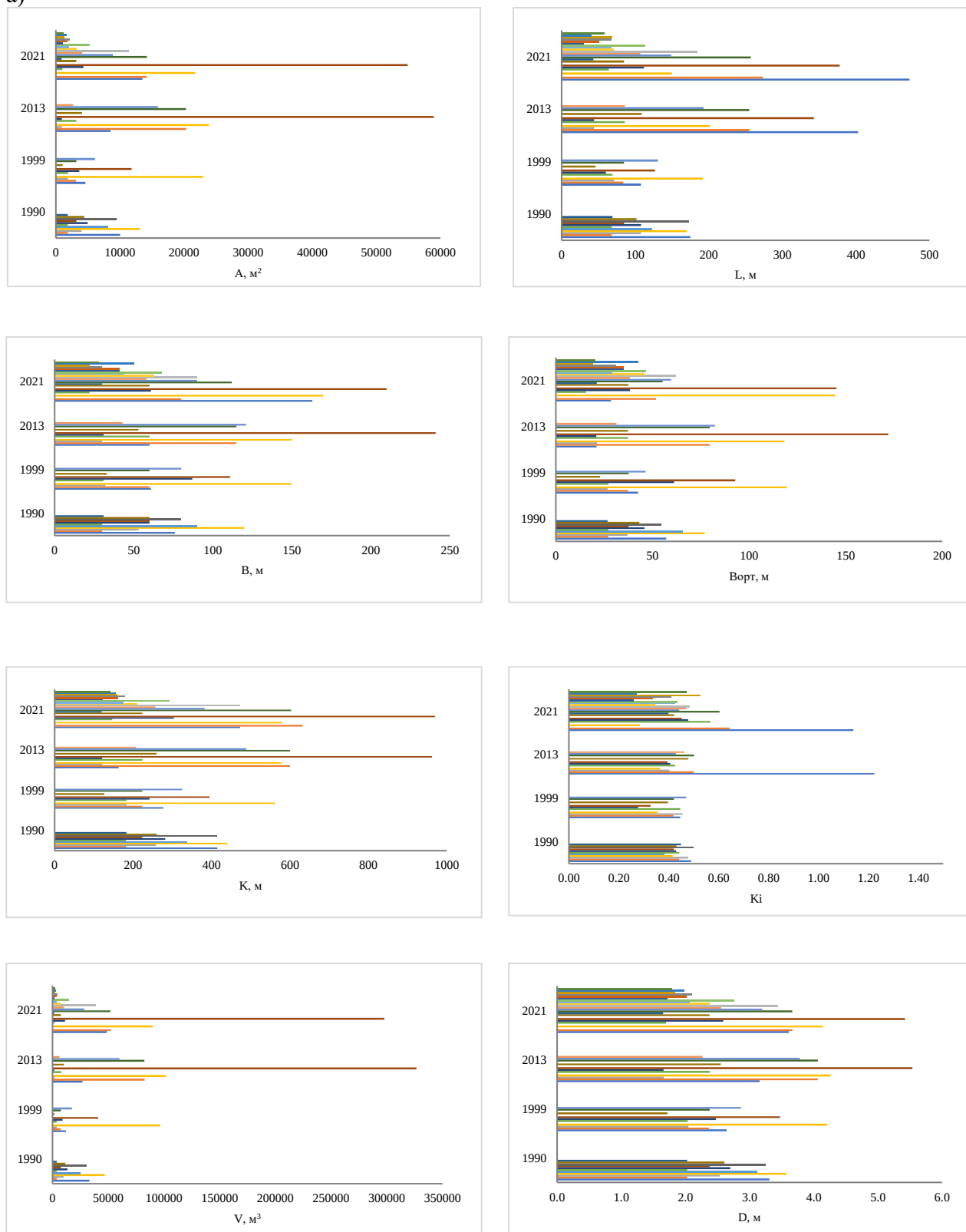
Кестеде көрсетілген морфометриялық сипаттамалардың ішінде көлдердің ауданы (A , m^2), жаға сызығының ұзындығы (K , m), ұзындығы (L , m) мен ені (B , m) ғарыштық суреттерді өңдеу арқылы ArcGIS 10.8 бағдарламасындағы ArcToolbox модуліндегі «Minimum Bounding Geometry» функциясы арқылы анықталды. Ал, көлдің орташа ені ($B_{орт}$, m) көл айдыны ауданының ұзындығына қатынасы ($B_{орт}=A/L$, m) негізінде, жаға сызығының дамуы $K_i=0.28(L/\sqrt{A})$ негізінде, орташа тереңдігі (D , m) көл көлемінің көл бетінің ауданына қатынасы ($D=V/A$) негізінде, жаға сызығы дамуының көрсеткіші көл ұзындығының көл бетінің ауданына қатынасы ($K_{жаға}=L/A$), созыңқылық көрсеткіші көл ұзындығының көлдің орташа еніне қатынасы ($K_{ұзын}=L/B_{орт}$), жинақылық көрсеткіші орташа енінің максималды еніне қатынасы ($K_{комп}=B_{орт}/B$) негізінде анықталды. Ал, көлдің көлемі (V , m^3) көл бетінің ауданы арқылы эмпирикалық тәуелділік негізінде бағаланды [44]:

$$V = 0,229 \times A^{1,290}$$

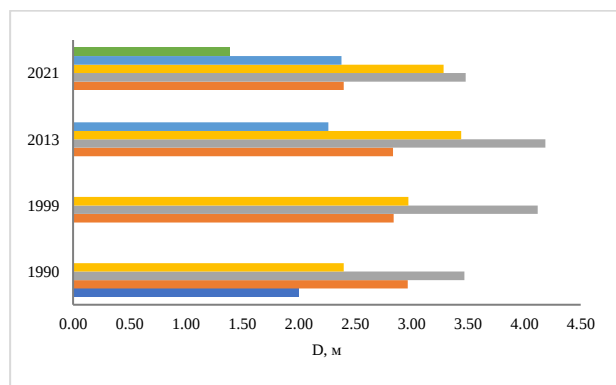
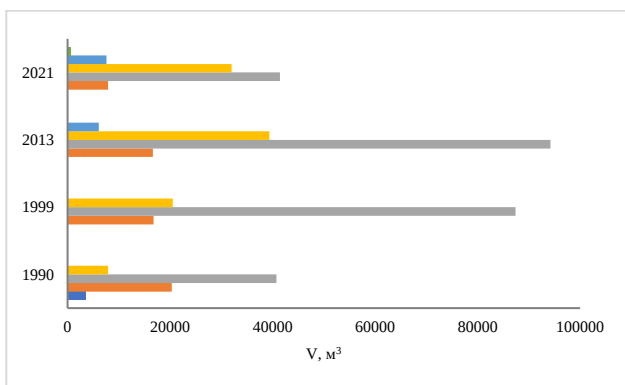
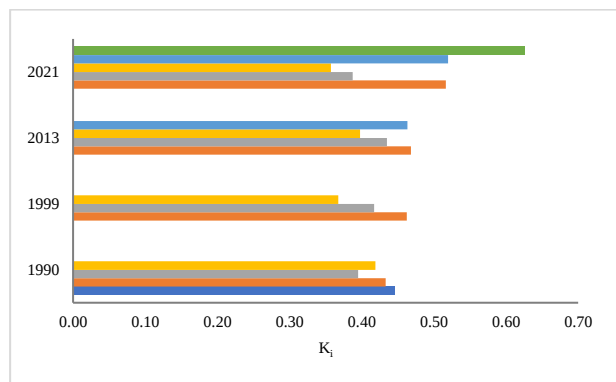
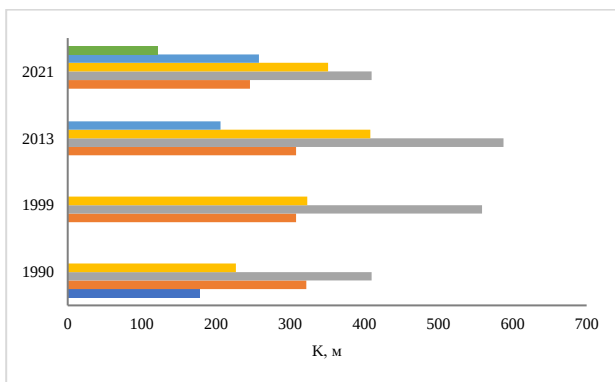
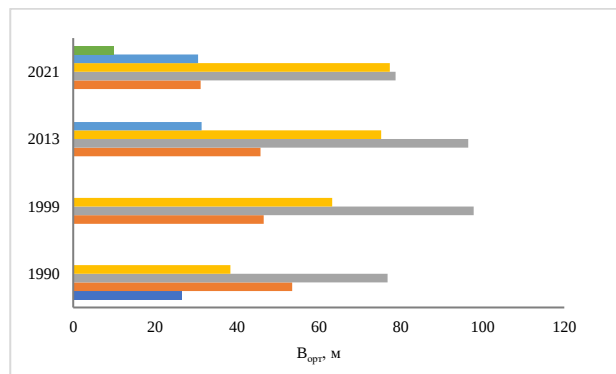
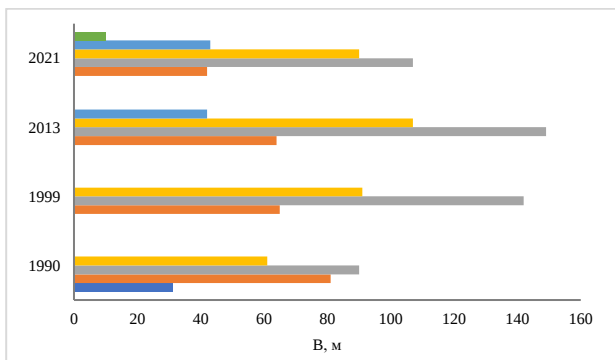
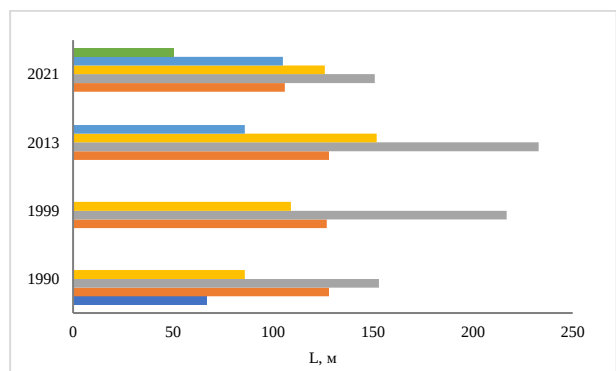
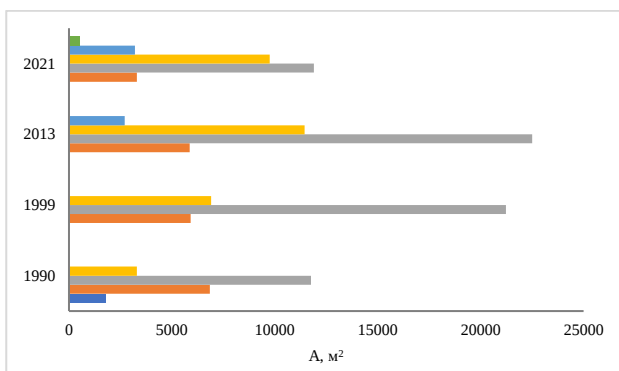
мұндағы A көл бетінің ауданы (m^2).

Қол жеткізілген нәтижелерді талдай отырып, кейбір көлдерде морфометриялық сипаттамалары бойынша өсіп жатқандығы байқалса, кейбір көлдерде керісінше төмендеп жатқаны анықталды (7а,ә-сурет).

а)



ә)



Сурет 7. а) Үлкен Алматы және ә) Кіші Алматы өзен алаптары бойынша мұздық-мореналық көлдерінің 1990-2021 жж. аралығындағы морфометриялық сипаттамаларының өзгеру графигі

Үлкен Алматы өзен алабы бойынша 1990-2021 жж. мұздықтық-мореналық көлдердің ауданы 1400-51700 м² аралығында өссе, 650-1210 м² аралығында азайған. Сондай-ақ, Кіші Алматы өзені алабы бойынша 500-6450 м² аралығында өссе, 150-3550 м² аралығында азайған. Мұздықтық-мореналық көлдер ауданы бойынша 1-94%, ұзындығы бойынша 4-78%, ені бойынша 2-71%, орташа ені бойынша 3-74%, жаға сызығының ұзындығы бойынша 7-77%, жаға сызығының дамуы бойынша 1-57%, көлемі бойынша 2-97%, орташа тереңдігі бойынша 5-56% аралығында өссе, сәйкесінше 13-77%, 4-59%, 2-48%, 13-43%, 8-53%, 2-28%, 17-85%, 4-34% аралығында азайған. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері Үлкен Алматы өзен алабы бойынша таралған мұздықтық-мореналық көлдердің ішінде оңтүстік шығыс бөлігінде орналасқан көлдердің морфометриялық сипаттамаларында өзгеру үлесі жоғары екендігін көрсетсе, оңтүстік батыс бөлігінде өзгеру үлесі мардымсыз. Ал, Кіші Алматы өзені алабы бойынша оңтүстік бөлігінің шығыс бөлігінде де, батыс бөлігінде де өзгеру байқалады.

3.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің жаға динамикасы, көл қазаншұңқырларының дамуы

Мұздықтық-мореналық көлдердің жаға динамикасы, көл қазаншұңқырларының қалыптасуы мен дамуына көл қазаншұңқырының генетикалық типі, оның қалыптасу жағдайлары, көл орналасқан мореналық шөгінділердің құрамы мен қасиеттері, мореналық шөгінділерде өлі мұздың болуы, көл деңгейінің ауытқуы сияқты факторлар тікелей әсер етеді.

Мұздықтық-мореналық көлдер генетикалық типі мен қалыптасу жағдайларына байланысты [8] ойпаңды, термокарстты, карстты, бөгелмелі деп бөлінеді. Мұздықтың ашық бөлігі мен моренаның фронтальды жотасы арасындағы морена бетіндегі жабық шұңқырлардың сумен толысуынан пайда болатын ойпаңды көлдер ең үлкен көлемге ие. Ойпаңды көлдердің қазаншұңқырлары ашық және көмілген мұздықтардың әркелкі еруі, сондай-ақ термокарст процестері нәтижесінде қалыптасады. Ойпаңды типтегі көлдердің пайда болуы мұздықтың ашық беті қолайлы климаттық аймаққа енген кезде басталады. Ойпаңды көлдер үшін қолайлы климаттық жағдайлар мұздықтардың кейін шегінуі және мұздықтардың кейін шегінуі нәтижесінде беткейінің төмендеуі кезінде қалыптасады. Көл байламының өткізгіш қасиетіне байланысты ағынды жер беті немесе моренаішілік жолмен жүзеге асырылады. Әдетте, ойпаңды көл байламының құрамы бос сынықты мореналық грунттан, қатты жентас немесе мұздан тұрады.

Ойпаңды көлдер салыстырмалы түрде қатты терең емес, олардың орташа және максималды тереңдігі, сәйкесінше 7 және 27 м құрайды. Морена бетіндегі теріс пішіндерді толтыра отырып, ойпаңды көлдер су бетінің контурының әртүрлі конфигурациясын алады. Олар көбінесе көлден судың ағып келу және ағып өту жолдары бағытында созыла қалыптасады. Ойпаңды көлдердің ауданы 600-700 мың м² дейін жетеді, олардың көлемі 1-2 млн м³

дейін, кей жағдайларда 10 млн м³ дейін жетуі мүмкін. Бос сынықты материалдар мен мұздан құралған көл байламының босау мүмкіндігінен, сондай-ақ көлдің моренаішілік дренаж жүйесімен гидравликалық байланысының нәтижесінде ойпаңды типтегі көлдердің ақтарылу қауіптілігі артуы мүмкін.

Термокарстты көлдер ойпаңды көлдерден қазаншұңқырларының мөлшері мен формасы жағынан ерекшеленеді. Олар термокарст процестері және көмілген мұздықтың жарылу деформациясы нәтижесінде жарықтарды, ойықтарды, термокарст шұңқырларының еріген сумен толысуынан пайда болады. Мұндай көлдердің пайда болуы үшін көл қазаншұңқыры моренаішілік ағын сулармен қиылысуы қажет. Көл қазаншұңқыры цилиндр немесе кесілген конус пішіндеріне ұқсас болып келеді. Көлдегі су морена асты жолмен ағып өтеді. Байламы морена жыныстарымен қапталған мұздықтан тұрады. Термокарстты көлдер салыстырмалы түрде терең. Дамыған күйдегі көлдің ұзындығы орта есеппен 200 м, ені 90 м, ал максималды ұзындығы мен ені 420 және 140 м жетуі мүмкін. Термокарстты көлдердің ауданы ойпаңды көлдерден әлдеқайда аз, орташа есеппен 30-120 мың м² аралығын құрайды. Көл қазаншұңқырының пайда болу механизмдерінің бірі көмілген мұздықтарда шөгу процесінің орын алуы болып табылады. Көлемі бірнеше жүз метрге, тереңдігі бірнеше ондаған метрге жететін шөгінділер термокарстты көлдердің пайда болуына әкеледі. Олар морена бетінің босаған жерлерімен шектеледі, олардың астында еріген сулар ағып өтетін моренаішілік каналдар, туннельдер, үңгірлер бар. Көл қазаншұңқырының пайда болуының басқа механизмі ретінде көмілген мұздықтың жарылу деформациясын көрсетуге болады. Мұздық тілінің көмілген бөлігіндегі мұздың ағу жылдамдығы фронталды морена бағытында азаяды. Осы бағытта көмілген мұздықтың қуаты да бәсеңдей түседі. Мұздықтың жоғарғы бөлігінде пайда болатын кернеу төменгі бөлігіне беріледі. Моренаның жекелеген учаскелерінде көмілген мұздықтағы кернеу беріктік шегінен асып, ол мұздың жарылуына әкеледі. Термокарстты көлдердің даму барысында оның ақтарылу қауіптілігі туындауы мүмкін. Термокарстты көлдердің ақтарылуы моренаішілік дренажды жүйе арқылы жүзеге асады.

Карлы көлдер - карлы мұздық әрекетінің нәтижесінде қалыптасқан цирк түбінің мореналық шөгінділеріндегі ойыстарды толтырып тұратын су қоймалары. Олар жартасты ригель және шағын морена білігімен бөгілген байламмен ерекшеленеді. Көлдердің су айнасы дөңгелек контур тәріздес, ал қазаншұңқырының пішіні ойпатқа ұқсайды. Карлы көлдер морфометриялық сипаттамалары бойынша ойпаңды көлдерге ұқсас. Олардың құрылымының маңызды ерекшеліктерінің бірі – көл байламының берік болуы және дренаждық арналардың болмауы. Сол себепті, аталған көлдер қауіптілігі төмен көлдер қатарына жатады. Олардың дамуы көлге келетін судың мөлшеріне және қазаншұңқырдың шөгіндімен толысу қарқындылығына байланысты. Қарстты көл қазаншұңқырларының көлемі жүздеген мың текше метрге жетуі мүмкін.

Бөгелмелі көлдердің пайда болуы негізгі алқапта және кейбір жеке су ағынында орналасқан моренаның қиылысқан жерлеріне тән. Әдетте көлдің бөгеттері екі немесе одан да көп мұздықтардың мореналары арқылы қалыптасады. Мұндай көлдер Памир тауларында жиі кездеседі. Көл байламы көмілген мұздықтардан құралады. Бөгелмелі көлдер су ағыны аңғарының морфологиясына, сондай-ақ мұздық бөгетінің биіктігі мен өткізгіштігіне байланысты көлемі жағынан шағын болады. Олардың ауданы 120 мың м², ал көлемі 3-4 млн м³ дейін болуы мүмкін. Бөгелмелі көлдер ұзындығы 5–7 км-ден асатын ірі аңғарлық мұздықтардың моренасында байқалады.

Мұздықтық-мореналық көлдер қазаншұңқырларының қалыптасуы, дамуы, жаға динамикасы және морфометриялық сипаттамалары көлдің ақтарылу қауіптілігінің дәрежесін анықтауға мүмкіндік беретін басты параметрлер.

Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық кешендегі түптік-мореналық түзілімдердің эволюциясымен тікелей байланысты болып келетін мұздықтық-мореналық көлдерге пайда болу, қалыптасу және жойылу (туу, жетілу және кәрілік) кезеңдері тән. Бұл процесс үздіксіз жүріп отырады және олардың даму кезеңдері гляциометеорологиялық, гидрологиялық, геологиялық және геоморфологиялық факторлармен де, криогендік құбылыстармен де анықталады.

Көл қазаншұңқырының пішіні мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болу, қалыптасу және жойылу кезеңдерінде маңызды рөл атқарады. Ол көлдің ауданы мен конфигурациясын, оның максималды және орташа тереңдігін, су массасының көлемін анықтап қана қоймай, сонымен қатар көлде болып жатқан процестерге де әсер етеді. Көл қазаншұңқырының көлемі мен пішінінің қалыптасуы температураның таралуына, сондай-ақ су деңгейінің ауытқуының амплитудасы мен сипатына тікелей байланысты. Көл қазаншұңқырының пішіні өзгерген сайын көлдердің гидрологиялық және термикалық режимдері де өзгереді [1]. Олардың қалыптасуы қалыптастырушы факторлардың әсерінен салыстырмалы түрде тұрақты табиғи таулы аудандарда (нивальды - гляциалды белдеу және ежелгі мұздық рельеф формаларының белдеуі) жүреді.

Осылайша көл қазаншұңқырының эволюциясы келесі кезеңдерді қамтиды:

- пайда болу – ағын судың кептелуіне немесе морена, мұздық денесінің деформациясына байланысты қазаншұңқырдың бастапқы толысуы;
- даму – су бетінің ауданы мен тереңдігінің және жаға сызығының қарқынды өсуі, жаға динамикасының өзгеруі;
- консервативті күй – су көлемінің көпжылдық орташа мәндерінен ауытқулардың байқалмауы;
- жойылу – көл қазаншұңқырының деградациясы, көлдің тым аз уақытта өз көлемін жоғалтуы немесе көлдің ақтарылуы (босауы).

Мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу, даму, жойылу кезеңдері Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарына да тән. 1970-2021 жж. аралығында қашықтықтан зондтау және ГАЗ технологияларының көмегімен

зерттеу ауданына қатысты мәліметтер өңделді. Ол үшін Landsat жерсерігінің әртүрлі кезеңдерде (1970-2020 жж.) түсірген ғарыштық суреттері дешифрленді.

Landsat жерсерігінің ғарыштық суреттерін дешифрлеу барысында Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің кейбіреулерінің көлемі артып, олардың ақтарылу қауіптілігі артып жатса, кейбір көлдердің мүлдем тартылып қалғанын байқауға болады. Атап айтқанда, зерттеу ауданындағы Үлкен Алматы өзен алабында 1978 ж. салыстырғанда көл қазаншұңқырының әрбір онжылдықтар бойынша даму кезеңдерін талдау нәтижелері төмендегіні көрсетті: 6 көлде даму кезеңі, 12 көлде қалыптасу кезеңі, 4 көлде жойылу кезеңі байқалса, қалған 4 көл конвервативті күй тән. Ал, Кіші Алматы өзен алабы бойынша 1978 ж. салыстырғанда 3 көлде 2013 ж. дейін қарқынды даму байқалып, ал 2013-2021 жж. аралығында олар консервативті күйге түскені анықталды. Сонымен қатар, 3 көл толықтай жойылып, 1 жаңа көл пайда болды.

Қарастырылып отырған барлық көлдердің қазаншұңқыры мұз басудың тікелей немесе жанама әсер ету аймағында орналасқан және қазір олардың түзілу сатысында [18]. Көл қазаншұңқырларының қалыптасуы биік таулы аумақтың салыстырмалы тұрақты табиғи жағдайында (нивалды-гляциалдық және ежелгі мұздықтық жер бедері зонасы) қозғаушы күштердің әсер етуіне тәуелді [19]. Көл қазаншұңқырларының дамуына ықпал ететін табиғи жағдайлардың өзгеруі пайда болатын көл алаптарындағы процестер мен факторлардың айтарлықтай өзгеруіне әкеле отырып, шөгінділердің жинақталу қарқындылығын және көлдің «жетілу» дәрежесін анықтайды [4]. Табиғи жағдайлар тұрақты және әрдайым әсер етуі нәтижесінде мұздықтық-мореналық көлдердің даму кезеңдері анықталады.

Табиғи жағдайлар – көл қазаншұңқырының пайда болуы мен дамуының негізгі фондық көрсеткіші. Олардың пайда болу жағдайларына морфолитологиялық, морфолитодинамикалық, климаттық, мұздықтық факторлар жатады [72]. Сонымен қатар, көлдердің қазаншұңқыры мен жағасының қалыптасуына және дамуына келесі факторлар әсер етеді: көл алабының генетикалық типі, көл орналасқан мореналық шөгінділерінің құрамы мен ерекшеліктері, морена шөгінділерінде көмілген мұздықтардың болуы, көлге жақын жерде ағынсулардың болуы және олардың қалыптасу ерекшеліктері, тұрақты және уақытша ағынсулардың болуы, су деңгейінің ауытқуы және қосымша факторлар – толқындар, ағыстар, мұз құбылыстары [71].

Мұздықтық-мореналық көл қазаншұңқырларының ауданы мен жаға динамикасын бағалаудағы ЖҚЗ мәліметтері және ГАЖ технологияларының рөлі зор. ЖҚЗ мәліметтері арқылы қол жеткізілетін мәндер бақыланған көрсеткіштермен салыстырылуы керек. Үлкен айырмашылықтар байқалған жағдайда әртүрлі топографиялық карталарды, соның ішінде сандық карталарды міндетті түрде жаңартылуы керек.

Зерттеу ауданы үшін ЖҚЗ мәліметтері және оларды сандық өңдеу әдістері арқылы мұздықтық-мореналық көлдердің жаға сызығының динамикасы бағаланды. Зерттеліп отырған Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің қазаншұңқырлары негізінен «Қазселденқорғау» ММ мамандары бойынша мореналық-термокарстты және мұздықтық болып айқындалған.

Жаға сызығы – теңіз, көл және басқа да су объектілерінің жер бетімен қиылысу сызығы. Су деңгейі қысқа уақыт аралығында өзгертіндіктен, жаға сызығы су объектісі деңгейінің орташа көпжылдық жағдайына қатысты қолданылатын шартты ұғым болып табылады [70]. Жаға сызығының тұрақсыздығы су деңгейінің тербелістерімен, термокарсттық процестердің көрініс беруімен, мұздықтардың кейін шегінуімен байланысты.

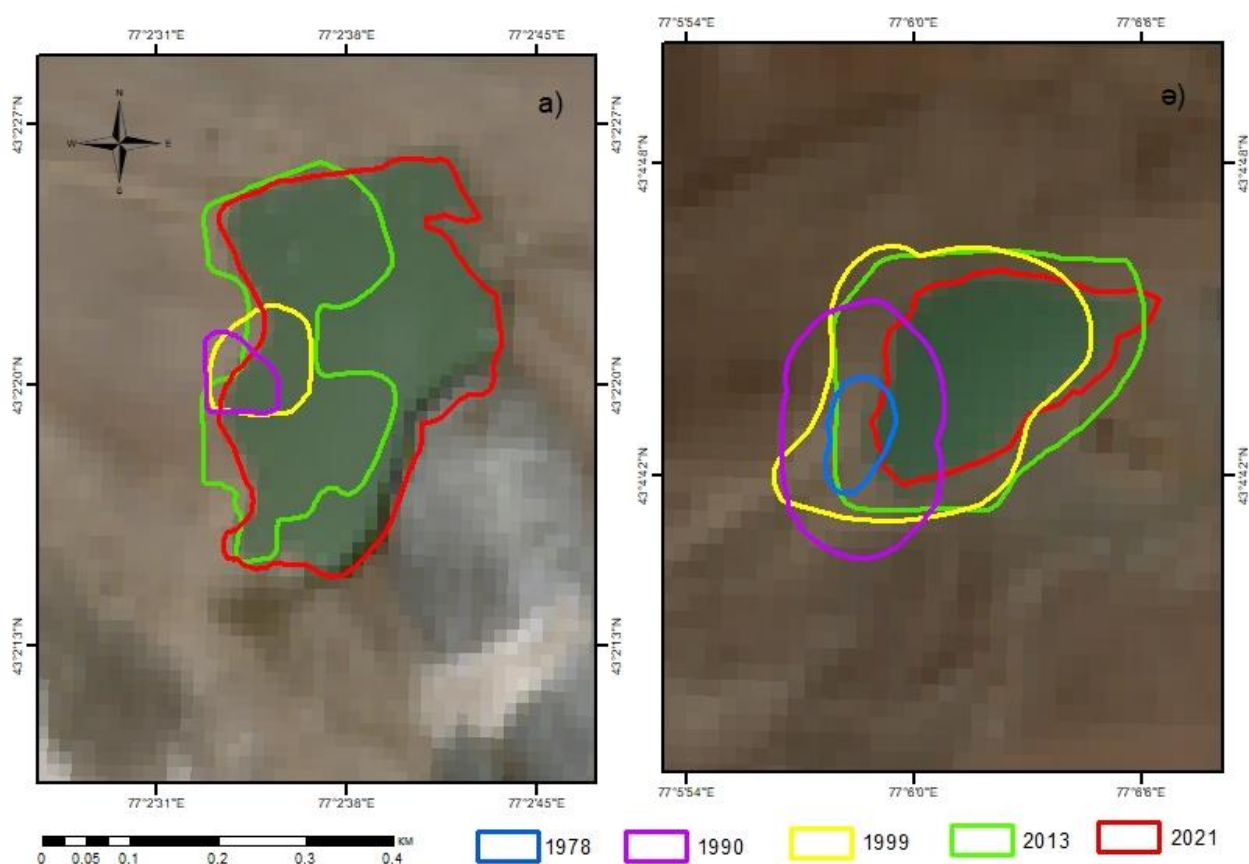
Сонымен қатар, мұздықтық аңғарларда көлдердің мұздықпен қоректенуі басым, бұл мұздықтық-мореналық көлдердің мұздықтардың кейін шегінуіне әкелетін жоғары ауа температурасына сезімталдылығын көрсетеді. Жоғары ауа температурасының көлдерге ықпалы көл байламының бұзылуына әкелетін термокарсттық процестердің белсенді көрініс беруі арқылы да байқалады. Бос сынықты материалдардың кеңінен таралуы және тік беткейлердің бір-біріне жақын орналасуы, термокарсттық процестердің көрініс беруі жаға опырылуының орын алуына қолайлы жағдай тудырады, яғни жаға сызығының өзгеруі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қаупін анықтау кезінде назардан сырт қалмауы керек. Зерттеу ауданындағы ақтарылу қаупі жоғары мұздықтық-мореналық көлдер ретінде Үлкен Алматы өзен алабындағы №13-бис, Кіші Алматы өзені алабындағы №6 көлдері таңдалып алынды.

Үлкен Алматы өзен алабының жоғарғы ағысында орналасқан №13-бис мұздықтық-мореналық көлі «Советов 2» мұздығының тілінде моренаның жоғарғы кертпешінде Үлкен Алматы өзенінің оң саласы болып табылатын Құмбелсу өзенінің жоғарғы ағысында 3554 абс. м биіктікте орналасқан. Көл қазаншұңқырының қалыптасу генезисі термокарстты. Көлдің қазаншұңқыры оңтүстік-шығыстан солтүстік батысына қарай созылған. Сонымен қатар, көлдің байламы ретінде бос сынықты жыныстармен көмкерілген көпжылдық тоңды массивтерден құралған «Советов» мұздығының фронталды моренасының жалы қызмет етеді. Сонымен қатар, «Советов 2» мұздығынан келетін мұздық ағындыдан, еріген қар суларынан қорек алады. Көлге құятын орташа мұздық ағынды мөлшері $0,2-0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ құраса, жоғарғы температуралық режимдегі оның максималды мәні $1 \text{ м}^3/\text{с}$ құрайды.

ЖҚЗ мәліметтері, атап айтқанда 1990-2021 жж. аралығындағы Sentinel-2 жерсерігінің ғарыштық суреттері негізінде №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің жаға сызығының ұзындығы мен ауданы артып жатқандығын байқауға болады (8а-сурет). Бұл термокарстты процестердің қарқынды жүре бастауы және мұздықтардың деградациясы әсерінен қарқынды дамуымен түсіндіріледі.

Ал, Кіші Алматы өзен алабында даму қарқындылығымен №6 мұздықтық-мореналық көлі ерекшеленеді. Кіші Алматы өзен алабының

жоғарғы ағысында шоғырланған №6 мұздықтық-мореналық көлі 3580 м биіктікте М.Маметова мұздығының тілінде орналасқан. Мұздықтық-мореналық көл өткен ғасырдың 50 жылдарынан бастап қалыптаса бастап, оның интенсивті толысуы 1970 жылдары байқалған. ЖҚЗ мәліметтерін талдау нәтижесінде бұл көлдегі жағалау сызығының ұзындығы мен ауданы 1978-2013 жж. аралығында қарқынды өскенін, алайда, 2021 жж. аталған мәндердің азайғанын байқауға болады (8ә-сурет). Ол антропогендік әсердің болуымен, мұздықтық-мореналық кешенінің еністігіне және орналасу жеріне байланысты ақтарылу қауіптілігін тудырғандықтан, 1976 жылдары көл қазаншұңқырларында су деңгейін төмендету жұмыстарының жүргізілуімен түсіндіріледі.

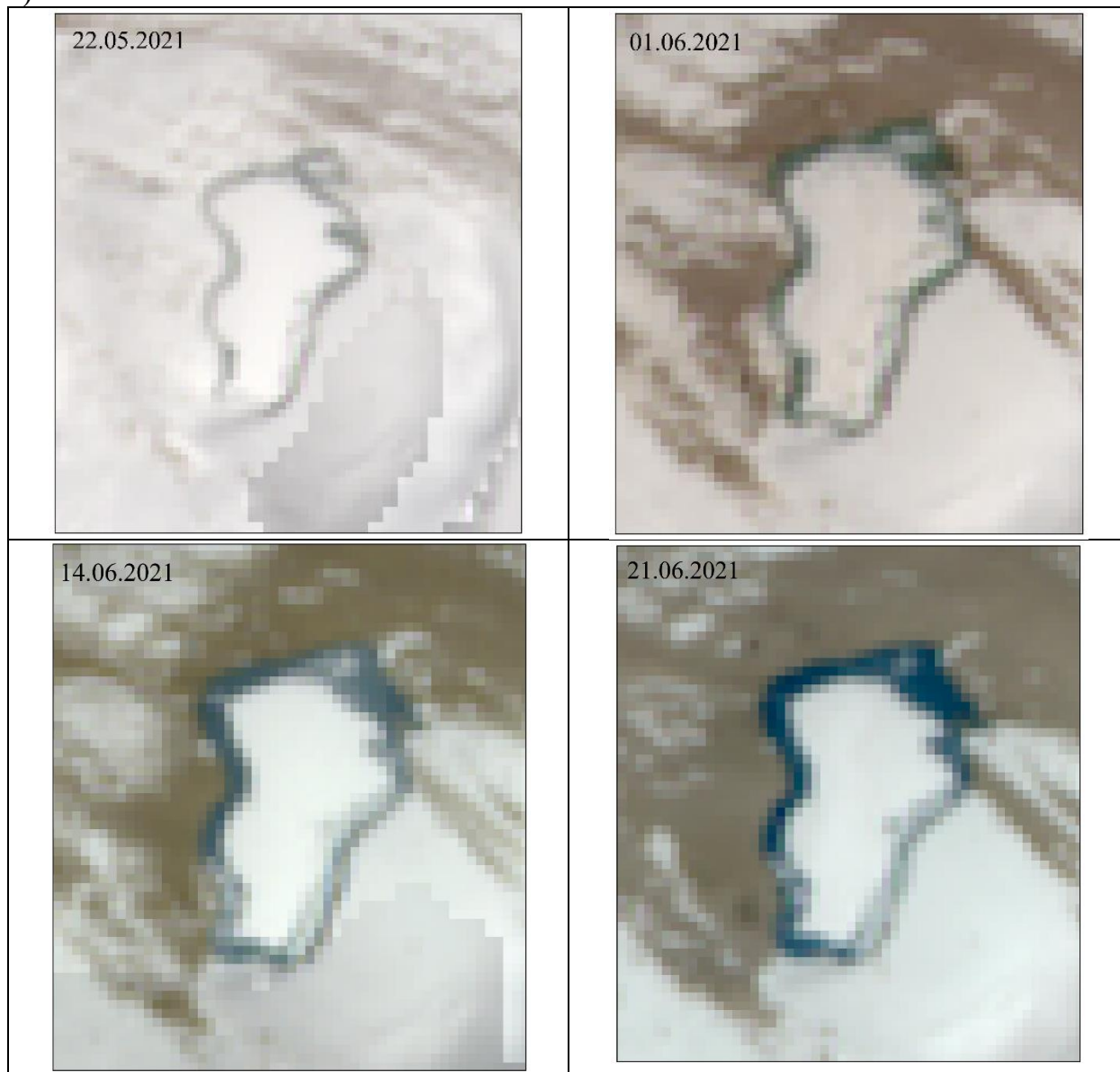


Сурет 8. а) №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің ә) №6 мұздықтық-мореналық көлінің 1978-2021 жж. аралығындағы даму динамикасы

Мұздықтық-мореналық көлдер қазаншұңқырының ауданы мен жаға сызығы мәндерінің ұлғаюы жаз айларында қарқынды байқалады. Оның негізгі себебі жаз айларындағы ауа температурасының және нөлдік изотерманың максималды мәндерімен және осы уақытта көлдердің мұз қабатынан босап шығумен түсіндіріледі. Сонымен қатар, ауа температурасының жоғарылауы және жауын-шашынның өзгергіштігі зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің мамыр-қыркүйек айларында ақтарылу қауіптілігінің артатындығы белгілі. Осыған орай, Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен

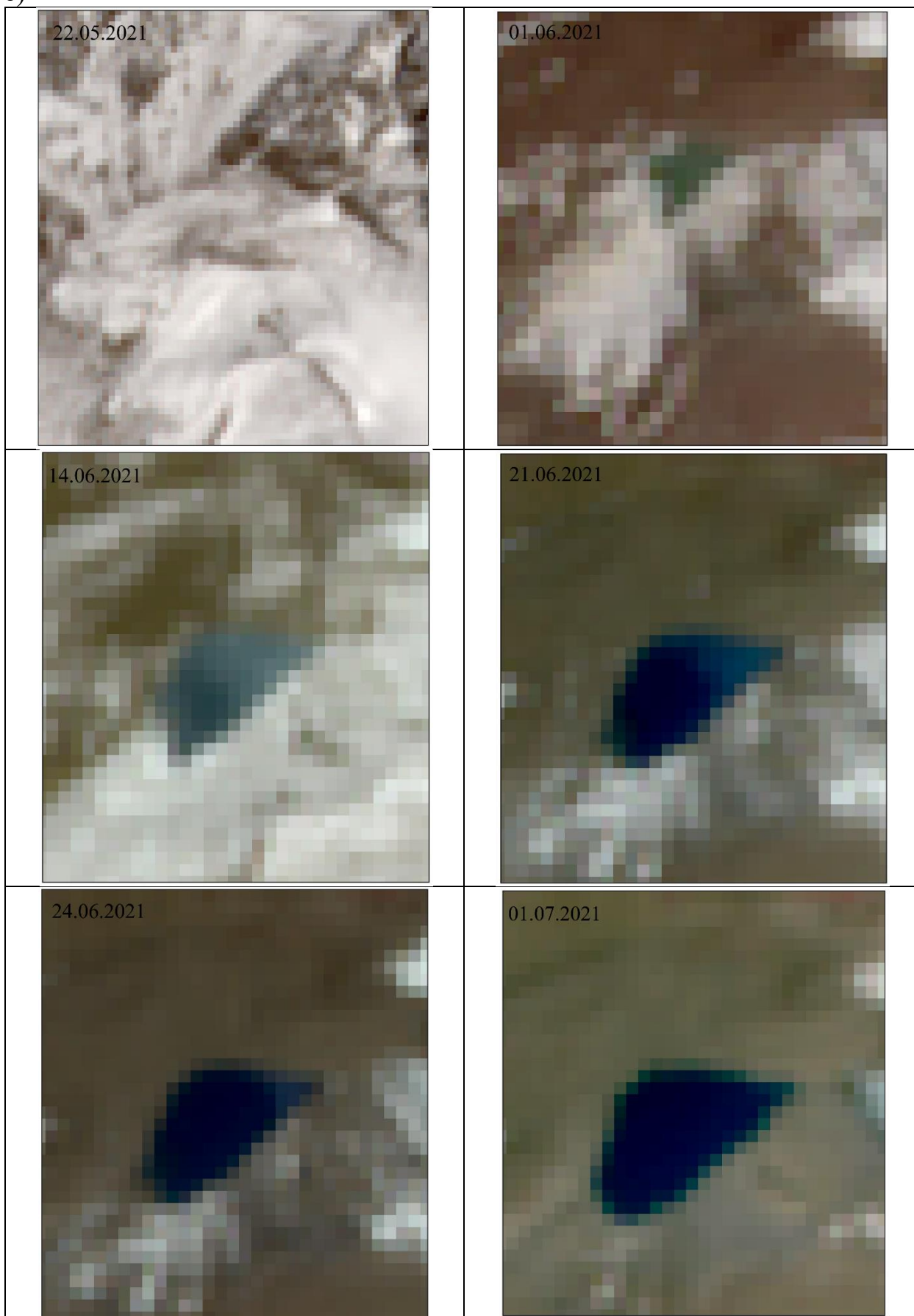
алаптарындағы жоғарыда көрсетілген (№13-бис және №6) көлдердің қазаншұңқыларының ауданы мен жаға сызығының динамикасын бақылау мақсатында Sentinel-2 жерсерігінің 2021 жылдағы мамыр-қыркүйек айларындағы ғарыштық суреттері өңделді (9а,ә-сурет).

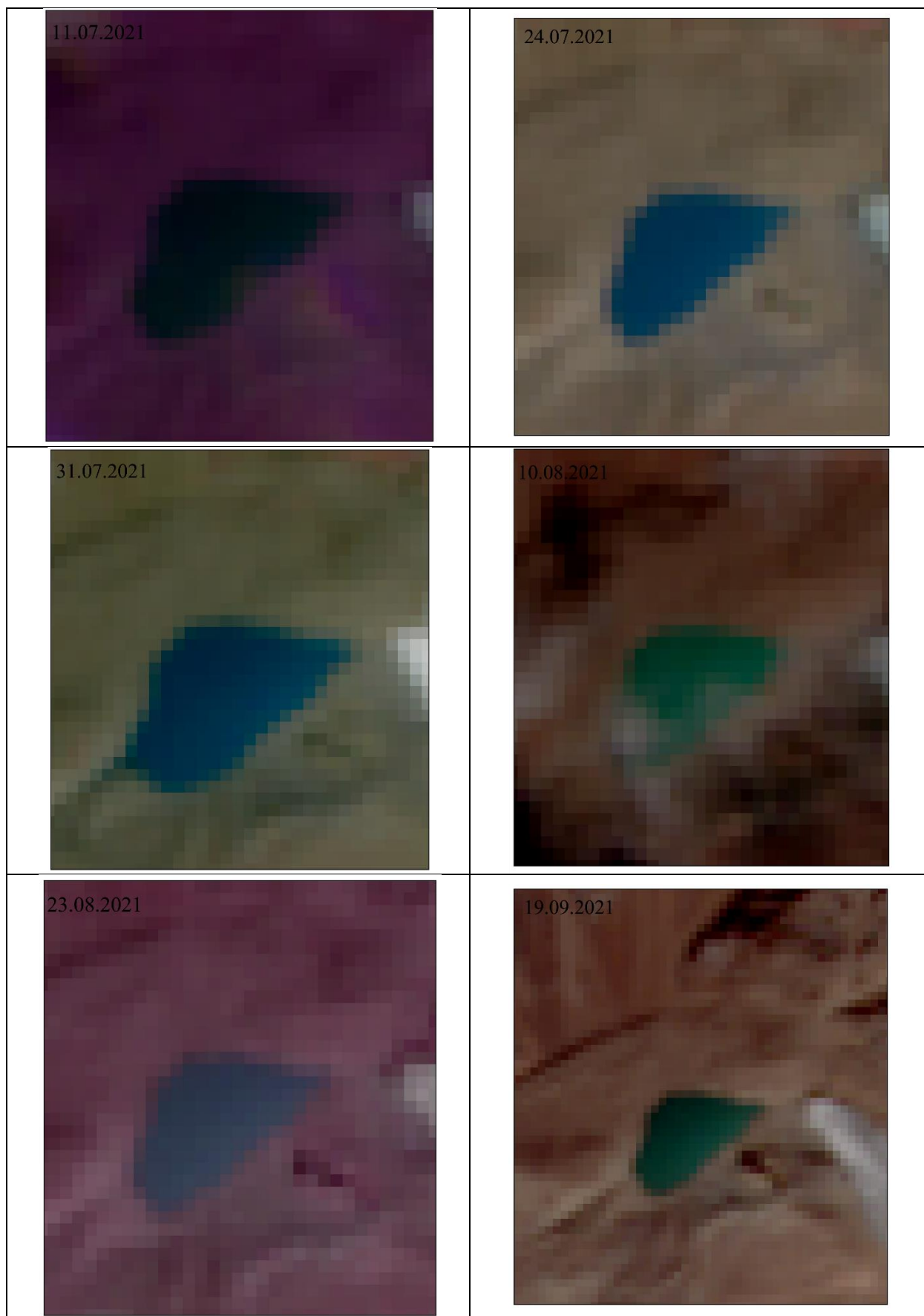
а)



24.06.2021 	01.07.2021 
24.07.2021 	31.07.2021 
20.08.2021 	19.09.2021 

а)





Сурет 9. а) Үлкен Алматы өзені алабындағы №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің мамыр-қыркүйек айларындағы өзгерісі

ә) Кіші Алматы өзені алабындағы №6 мұздықтық-мореналық көлінің мамыр-қыркүйек айларындағы өзгерісі

Мұздықтық-мореналық көлдердің жаға динамикасын бағалау үшін келесі көрсеткіштер: көл қазаншұңқырының ауданы (A , m^2), жаға сызығының ұзындығы (K , m), көл ұзындығы (L , m), көлдің ені (B , m) және жаға сызығының даму көрсеткіші (K_i) анықталды (Кесте 3.1-3.2).

Кесте 3.1 Үлкен Алматы өзені алабындағы №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің мамыр-қыркүйек айларындағы морфометриялық сипаттамалары

№	Дата	1.05-19.09 аралығыдағы ауа температурасының суммасы, °C	1.05-19.09 аралығыдағы ауа температурасының орташа мәндері, °C	Көрсетілген датаға дейінгі 10 күндік ауа температурасының суммасы, °C	Ауданы, m^2 (A)	Ұзындығы, m (L)	Ені, m (B)	Жаға сызығының ұзындығы, m (K)	Жаға сызығының дамуы (K_i)
1	22 мамыр	52,4	2,4	3,3	45862	355	227	1040	682
2	1 маусым	127,9	3,9	75,5	50984	358	230	1049	754
3	14 маусым	218,6	4,9	64,8	58236	379	246	1037	838
4	21 маусым	256,3	4,9	44,7	59919	380	248	1061	861
5	24 маусым	274,4	5	55,8	59284	384	250	1097	847
6	1 шілде	333,3	5,4	77	61910	387	258	1150	881
7	24 шілде	563,3	6,6	92,7	51599	376	245	1114	745
8	31 шілде	641,1	6,9	111,1	55767	377	256	1125	804
9	20 тамыз	795,2	7,1	93,7	49160	358	244	1026	727
11	19 қыркүйек	1022,1	7,2	60,2	59966	378	250	1074	864

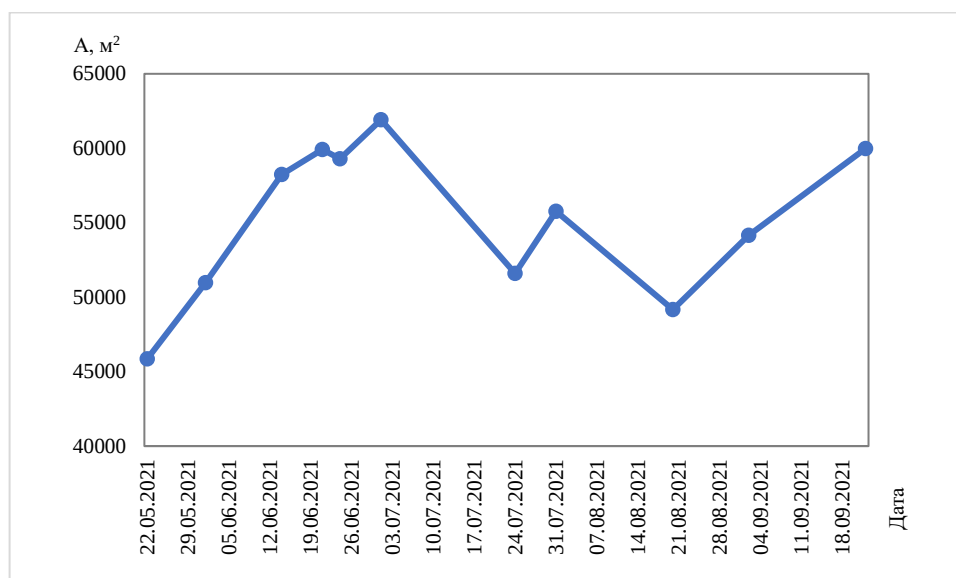
Кесте 3.2 Кіші Алматы өзені алабындағы №6 мұздықтық-мореналық көлінің мамыр-қыркүйек айларындағы морфометриялық сипаттамалары

№	күні	01.05-19.09 аралығыдағы ауа температурасының суммасы, °C	01.06-19.09 аралығыдағы ауа температурасының орташа мәндері, °C	Көрсетілген датаға дейінгі 10 күндік ауа температурасының суммасы, °C	Ауданы, m^2 (A)	Ұзындығы, m (L)	Ені, m (B)	Жаға сызығының ұзындығы, m (K)	Жаға сызығының дамуы (K_i)
1	1 маусым	127,9	3,9	75,5	3161	89	54	229	94
2	14 маусым	218,6	4,9	64,8	7375	134	76	351	178
3	21 маусым	256,3	4,9	44,7	9260	163	86	439	203
4	24 маусым	274,4	5	55,8	9549	168	87	420	206
5	1 шілде	333,3	5,4	77	14059	198	104	518	280
6	24 шілде	563,3	6,6	92,7	12069	186	102	491	248
7	31 шілде	641,1	6,9	111,1	17504	226	121	562	326
8	10 тамыз	734,8	7,2	93,7	11905	184	95	467	246
9	23 тамыз	827,7	7,2	66,2	11174	174	90	433	237
10	19 қыркүйек	1022,1	7,2	60,2	13541	195	115	499	272

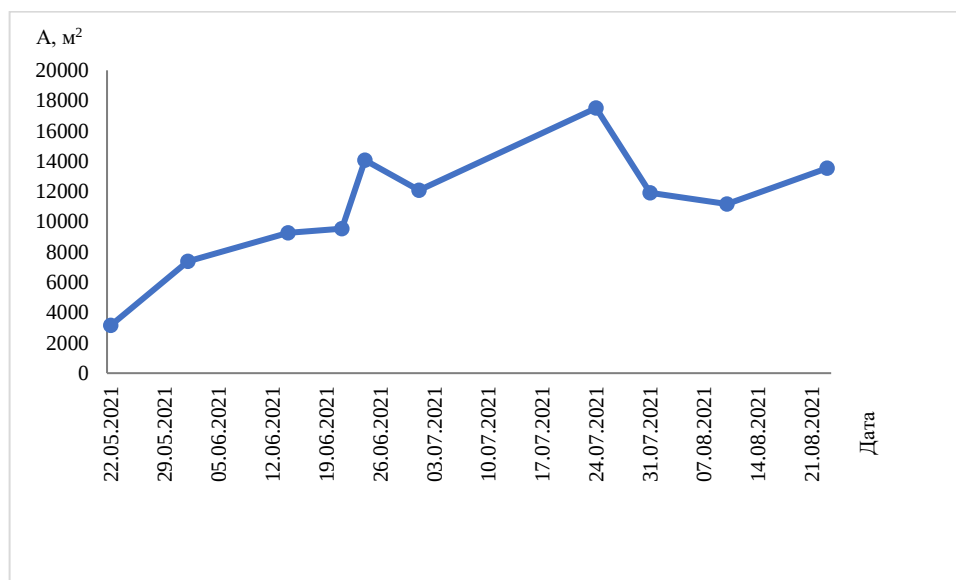
Ғарыштық суреттерді өңдеу нәтижелері №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің мұздан толықтай босап шығуы 24.06-01.07 уақыт аралығына тән екендігін көрсетті. Мыңжылқы метеостанциясы бойынша 1 мамырдан бастап таңдалған ғарыштық суреттердің даталарына дейінгі орташа

тәуліктік температура мәндерінің жиынтық суммасы есептелді. Медеу А.Р. [4] еңбегінде мұздықтық-мореналық көлдің ақтарылу критерийі ретінде күнтізбелік жылдың 1 мамырынан бастап маусым, шілде, тамыз айларының әрбір декадасы бойынша жиынтық температура мәндерінің шекті көрсеткіштері келтірілген. Есептелген мәндерді жоғарыда келтірілген шекті температура мәндерімен салыстыру 20 маусымнан бастап шекті мәннен жоғары екендігін көрсетті. Бұл мұздықтық-мореналық көлдің қарқынды өсуіне ықпал ету керек еді, дегенмен өсу қарқындылығы аса жоғары емес, бұл зерттеу ауданында алдын алу жұмыстарының уақытылы жүргізілуімен түсіндіріледі. Ғарыштық суреттерге сәйкес, көлдің морфометриялық сипаттамаларының 2021 жылдағы ең жоғары мәндері 1 шілдеде байқалды: ауданы - 61910 м², ұзындығы - 387 м және ені - 258 м құрады, жаға сызығының ұзындығы 562 м, оның дамуы 326 құрады (10а-сурет).

а)



ә)



Сурет 10 – а) №13-бис мұздықтық мореналық көлінің 2021 жж. мамыр-қыркүйек айларындағы өзгеру динамикасы; ә) №6 мұздықтық мореналық көлінің 2021 жж. мамыр-қыркүйек айларындағы өзгеру динамикасы

Мыңжылқы метеостанциясы бойынша 1 мамырдан бастап таңдалған ғарыштық суреттердің даталарына дейінгі орташа тәуліктік температура мәндерінің жиынтық суммасы №6 мұздықтық-мореналық көлге қатысты салыстырылды. Салыстыру нәтижелері ауа температурасы өзгерісінің №6 мұздықтық-мореналық көл бойынша да Медеу А.Р. [4] еңбегінде келтірілген жаз айларының әрбір декадасының шекті мәндерінен жоғары екендігін көрсетті, және алдын-алу жұмыстарының, соның ішінде сифонды сорғылардың уақытылы қосылуы бұл көлдің ақтарылу қауіптілігін сейілтті. Зерттеу нәтижелері бойынша Кіші Алматы өзені алабындағы №6 мұздықтық-мореналық көлі 22 мамырда мұз бен қарға көмкерілгенін байқауға болады. Мұздан босап шығуы 01.06-14.06 уақыт аралығына тән. Көл ауданының, ұзындығы мен енінің ең жоғары мәндері 31 шілдеде байқалып, олар 17504 м², 226 м және 121 м құрады (10ә-сурет).

3.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы және олардың даму динамикасы

Мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, даму динамикасы, таралуы жөніндегі мәліметтерді алу, аймақтағы қауіптілік пен қауіпті басқаруға қатысты талдау жасауда аса маңызды [73]. Осыған орай, Іле Алатауының орталық бөлігіндегі Үлкен Алматы және Кіші Алматы алаптарында орналасқан мұздықтық-мореналық көлдердің даму динамикасы мен қазіргі жағдайын 1978-2021 жж. аралығында алынған ЖҚЗ және ГАЖ технологиялары негізінде зерттеу нәтижесінде зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің жүйелі инвентаризациясы дайындалып, көлдерде орын алған өзгерістер мен олардың даму динамикасына салыстырулар мен талдаулар жүргізілді [33], [74].

Ғарыштық суреттер арқылы су объектілерін идентификациялау үшін су индексінің әртүрлі түрлерін қолдануға болады [75]. Зерттеліп отырған мұздықтық-мореналық көлдерді идентификациялау үшін NDWI тәсілі таңдалып алынды. Ғарыштық суреттерде су объектілері 0,2-ден 1-ге дейінгі аралықтағы мәндерді қабылдайтындығы, ал ылғалы жоқ объектілер 0-ден төменгі мәндерді қабылдайтындығы белгілі. NDWI пайдаланудың басты артықшылығы су объектілерін анықтау мүмкіндігі. Сондай-ақ NDWI атмосфералық бұрмалануға аз ұшырайды [76]. Макфитерс анықтаған NDWI [77] индексі – су объектілерін белгілеп көрсететін, сонымен бірге өсімдіктер мен топырақтың басқа да ерекшеліктерін тежейтін жасыл және жақын инфрақызыл спектрлік жолақтар арасындағы қатынастардың қалыпқа келтірілген индексі. NDWI ашық су объектілерін анықтау және ғарыштық суреттегі топырақ пен өсімдіктерден ажырату үшін қолданылады.

NDWI ылғал қорын тиімді анықтайтындықтан, оны Gao [78] анықтаған NDWI-мен жиі шатастырады. Шындығында, бұл бірегей есептеу формулалары мен қолдану аясы бар әртүрлі индекстер. Gao анықтаған NDWI өсімдік жапырақтарында ылғалдың болуын жақсарту үшін NIR-SWIR (жақын инфрақызыл және қысқа толқын) комбинациясын пайдаланады. Ал, Макфитерс анықтаған NDWI су қоймаларындағы өзгерістерді анықтау үшін GREEN-NIR (көрінетін жасыл және жақын инфрақызыл) комбинациясы арқылы есептеледі. Осылайша, NDWI су объектілерінің құрамындағы мардымсыз өзгерістерді анықтау және бақылау үшін қолданылады. NIR (инфрақызыл жақын) және GREEN (көрінетін жасыл) спектрлік жолақтардың артықшылығын пайдалана отырып, NDWI ғарыштық суреттегі су объектілерін анықтап көрсете алады және келесі формулалар арқылы өрнектеледі (2):

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (2)$$

Landsat 2 үшін:

$$NDWI = (Band 1 - Band 3)/(Band 1 + Band 3)$$

Landsat 5 және Landsat 7 үшін:

$$NDWI = (Band 2 - Band 4)/(Band 2 + Band 4)$$

Landsat 8 үшін:

$$NDWI = (Band 3 - Band 5)/(Band 3 + Band 5)$$

Sentinel 2 үшін:

$$NDWI = (Band 3 - Band 8)/(Band 3 + Band 8)$$

Бұл толқындар ұзындығын таңдау толқын ұзындығының жасыл спектріндегі су объектілерінің шағылысу сипаттамаларының максималды мәндерінің, ал жақын инфрақызыл спектрде олардың ең аз мәндерінің сәйкес келуіне, ал өсімдіктер мен топырақтың максималды мәндері сәйкес келуіне негізделген [76].

NDWI индексі төмендегідей міндеттерді шешу үшін пайдаланылады:

1. Жапырақтағы су мөлшерінің өзгеруін бақылау;
2. Зерттелетін аумақтың өртке бейімділігін талдау;
3. Өсімдіктердің құнарлылығын модельдеу;
4. Сулы-батпақты жерлер арасындағы жер үсті суларын анықтау;
5. Жер бетінің сумен қамтамасыз етілу дәрежесін өлшеу.

Мұздықтық-мореналық көлдер әртүрлі физикалық және химиялық жағдайларға байланысты әртүрлі спектрлік сипаттамаларға ие болғандықтан, көлдердің пиксель мәндері үшін кең NDWI диапозондарын береді [19]. Яғни, зерттелініп отырған аудандағы мұздықтық-мореналық көлдер үшін NDWI диапозоны әртүрлі болуы мүмкін. Сол себепті, олар қандай да бір шекті мәнмен шектелмейді [79].

Көптеген зерттеушілер [69], [80], [81] мұздықтық-мореналық көлдерді идентификациялау үшін 0,15 шекті мәнін қабылдаған. Сол себепті, Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігін зерттеу барысында, 0,15-тен жоғары диапозондағы NDWI мәндері мұздықтық-мореналық көлдерді айқындайтын пиксельдерді идентификациялау үшін қолданылды. Landsat 2 ғарыштық түсірілімдерінен су индексін анықтау үшін B1-B3 жолақтары, Landsat 5, Landsat 7 ғарыштық түсірілімдерінен су индексін анықтау үшін B2-B4 жолақтары, Landsat 8 ғарыштық түсірілімінен B3-B5 жолақтары және Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдерінен B3- B8 жолақтары қолданылды.

NDWI индексінің оң диапозоны ретінде белгілен мән арқылы көлдерді анықтау және жер бедерінің сандық моделін пайдалана отырып мұздықтық-мореналық көлдерді карта бетіне түсіру ArcGIS 10.8 бағдарламасы арқылы жүзеге асырылды. Карта бетіне түсіру бірнеше кезеңді қамтиды. Біріншіден, зерттеліп отырған аудандағы мұздықтық-мореналық көлдерін карталаудың алдын-ала нәтижелерін алу үшін Landsat 2, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 және Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдеріне сегментация жасалды. Екіншіден, әрбір зерттелініп отырған жылдар үшін алдын-ала алынған нәтижелерді талдай отырып, әрбір жеке көлге сандық жұмыстары жасалды.

Спектрлік шағылысу нәтижесінде кейбір көлеңкелі аймақтар мұздықтық-мореналық көл ретінде қате классификациялануы мүмкін. Сол себепті, дұрыс классификацияланбаған немесе анықталмаған көлдерді Google Earth-тегі кескіндермен беттестіре отырып, салыстыру нәтижесінде түзетулер жүргізілді.

Карталау жұмыстары жасалғаннан кейін, мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен даму динамикасын бағалау мақсатында инвентаризацияны әзірлеу үшін әрбір көлге атрибут ретінде келесі сипаттамалар берілді:

- Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдерінің атауы немесе нөмірі;
- Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдерінің (X, Y) координаталық мәндері;
- Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдерінің биіктік белгілері, м;
- Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдерінің ауданы (A, м²):

$A > 5000$;

$5000 < A < 20000$;

$20000 < A$.

Зерттеліп отырған аудан үшін мұздықтық-мореналық көлдердің ауданын және т.б. сипаттамаларын қашықтықтан зондау мәліметтерін қолдана отырып дәл есептеу мүмкін емес. Есептеулерді жүргізу барысында қандай да бір қателіктер кетуі айқын. Яғни, мұздықтық-мореналық көлдердің түсірілімде берілген көріністері түсірілімдердің кеңістікті кескіндеу мүмкіндіктеріне, түсірілген уақыттағы көлдердің жағдайына (бұлт, тау жоталарының көлеңкелері немесе қар жамылғысы) тәуелді болатын әртүрлі деңгейдегі қателіктерді береді [82].

Зерттеу ауданы үшін қателіктерді максималды азайту мақсатында мұздықтық-мореналық кешендегі қар және мұз жамылғысының барынша аз мөлшері байқалатын маусым-тамыз айларының ғарыштық түсірілімдері пайдаланылды. Мұздықтық-мореналық көлдерді анықтаудағы қателіктерді бағалау үшін Хеншоу мен Букхаген ұсынған әдісі [83] қолданылды. Бұл әдіс ауданды анықтау және өлшеудегі қателік Гаусс үлестірімі негізінде, яғни көрсетілетін пикселдердің ~ 69% (1σ) қателіктерге ұшырайды деген болжамға негізделген [84]. Сонымен, аудандардың қателігі келесі формулалармен есептеледі [85] (3,4):

$$\text{Error}(1\sigma) = (P / G) * 0,6872 * G2 / 2 \quad (3)$$

$$E = \text{Error}(1\sigma) / A * 100\% \quad (4)$$

мұндағы P – картаға түсірілген көлдің периметрі, G – тор ұяшығының өлшемі, E – мұздықтық-мореналық көлдің салыстырмалы қателігі, A - мұздықтық-мореналық көлдің ауданы.

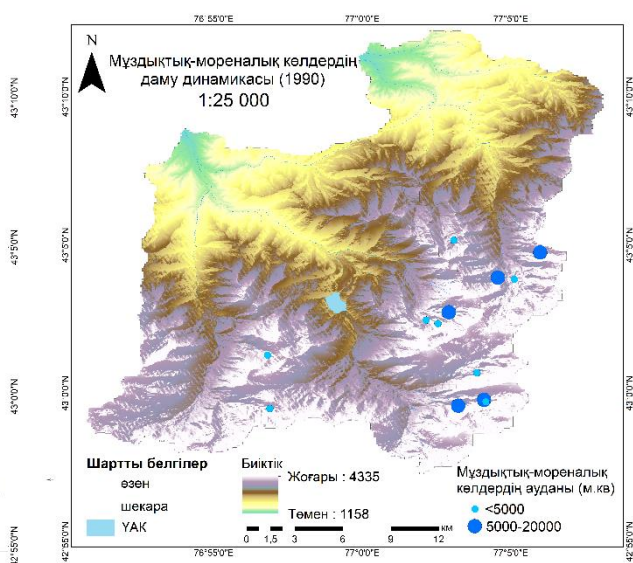
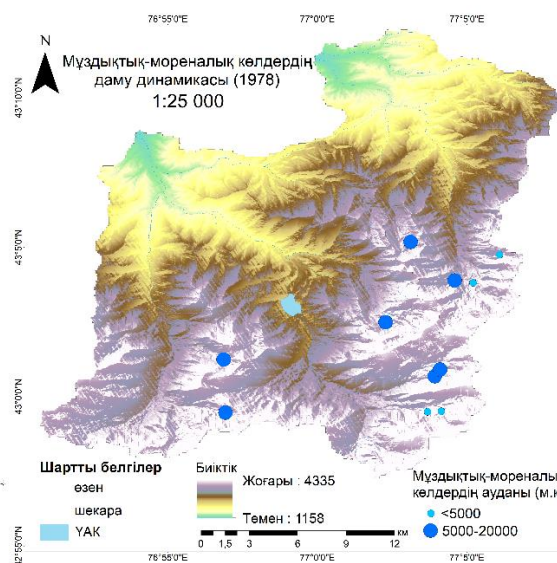
Анықталған қателіктер шамамен 5% аспауы қажет, бұл қашықтықтан зондтау әдістері арқылы мұздықтардың контурын бағалайтын зерттеулермен салыстыра отырып белгіленген көрсеткіш [83].

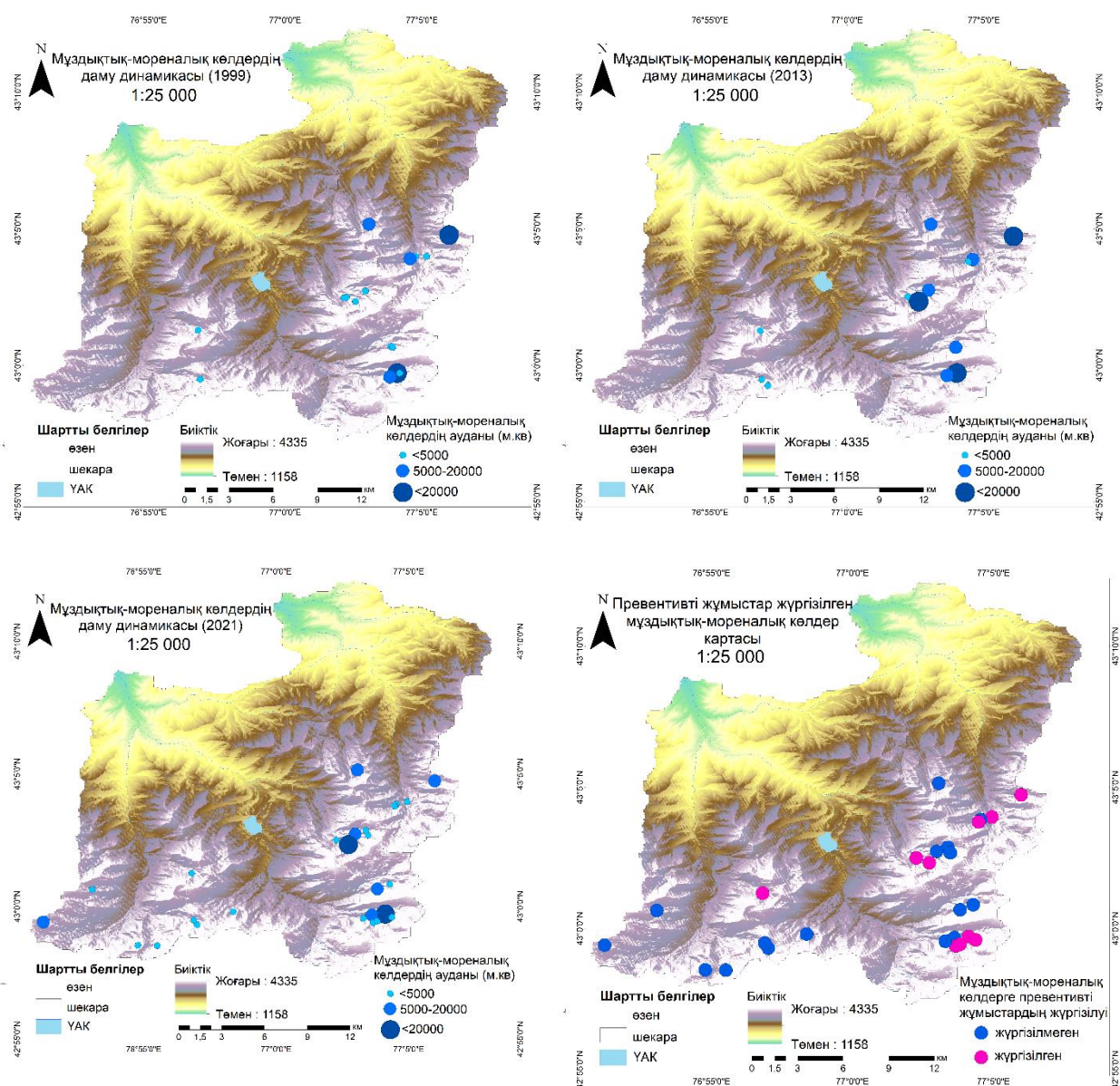
Зерттеу нәтижелері негізінде 1978 жыл бойынша жалпы ауданы 79600 м² болатын 11 мұздықтық-мореналық көлдер, 1990 жыл бойынша жалпы ауданы 71850 м² болатын 13 мұздықтық-мореналық көлдер, 1999 жыл бойынша жалпы ауданы 85450 м² болатын 15 мұздықтық мореналық көлдер, 2013 жыл бойынша жалпы ауданы 159650 м² болатын 15 мұздықтық мореналық көлдер, 2021 жыл бойынша жалпы ауданы 184400 м² болатын 26 мұздықтық мореналық көлдер анықталды және картаға түсірілді (4-кесте) (11-сурет).

Кесте – 4. Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзені алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің өсу қарқындылығы

Жыл	Зерттеу ауданы	Саны	Ауданы (м ²)			Өсу қарқындылығы		Қателікте р (%)
			<5000	5000-20000	20000<	Жалпы ауданы (м ²)	%	

			саны	м²	саны	м²	саны	м²			
1978	Үлкен Алматы	7	2	5400	5	4760 0	-	-	53000	100	11
	Кіші Алматы	4	1	1800	3	2480 0	-	-	26600	100	22
1990	Үлкен Алматы	9	6	1750 0	3	3110 0	-	-	48600	91	5.7
	Кіші Алматы	4	2	4650	2	1860 0	-	-	23250	87	12.7
1999	Үлкен Алматы	10	8	2040 0	1	6100	1	2295 0	49450	102	5.1
	Кіші Алматы	5	2	3800	2	1140 0	1	2080 0	36000	155	4.8
2013	Үлкен Алматы	11	6	1125 0	3	4420 0	2	6175 0	117200	237	3.6
	Кіші Алматы	4	1	2700	2	1730 0	1	2245 0	42450	118	9.1
2021	Үлкен Алматы	21	14	2640 0	5	5295 0	2	7655 0	155900	133	0.6
	Кіші Алматы	5	3	6900	2	2160 0	-	-	28500	67	3.5

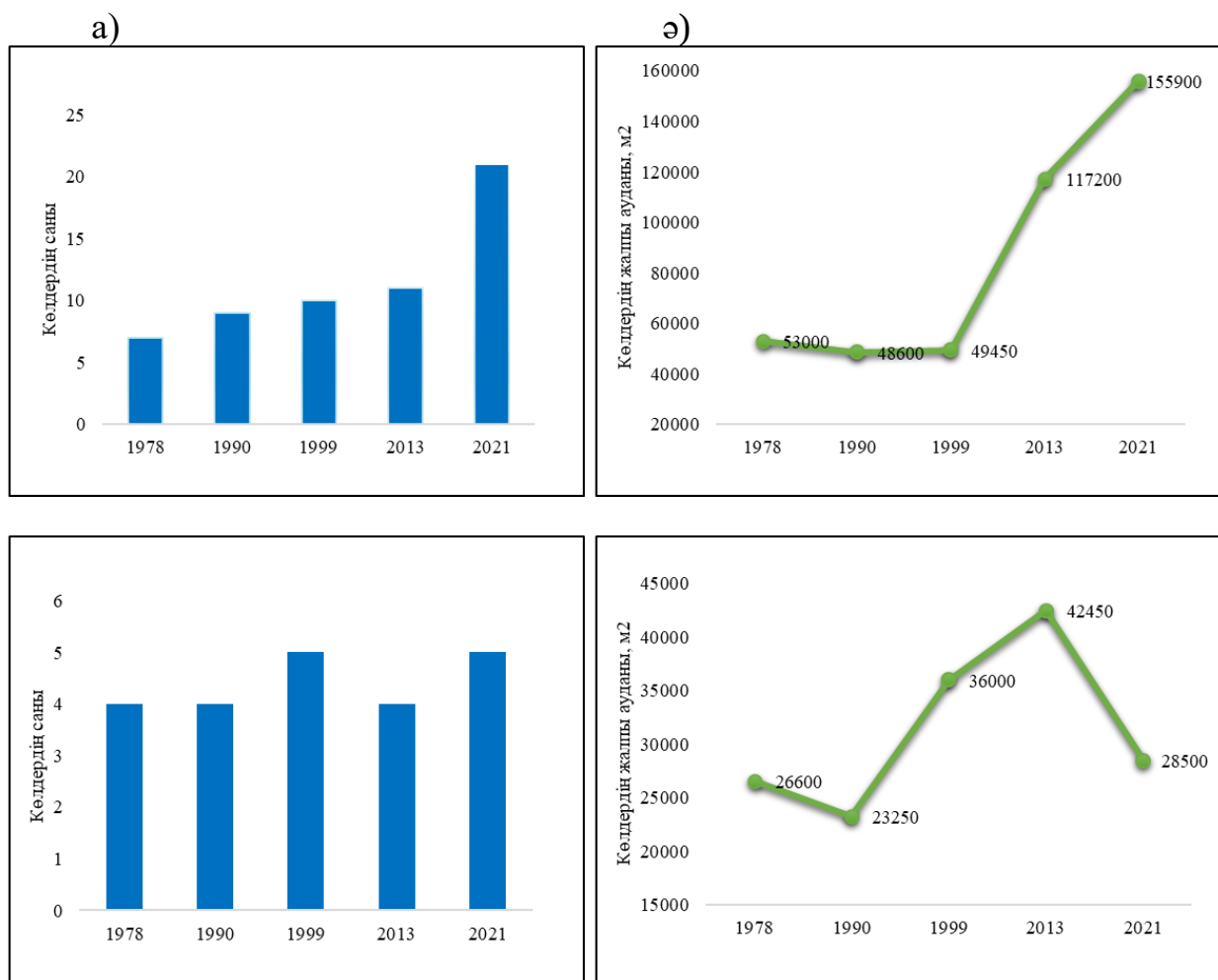




Сурет 11. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары бойынша 1978-2021 жж. аралығындағы мұздықтық-мореналық көлдердің даму динамикасы

Оның ішінде 07.29.1978 ж. түсірілген Landsat-2 ғарыштық түсірілімдері бойынша анықталған жалпы ауданы 53000 м² болатын 7 мұздықтық-мореналық көлдер Үлкен Алматы өзен алабында, жалпы ауданы 26600 м² болатын 4 көл Кіші Алматы өзен алабында орналасқан. Сонымен қатар, 07.08.1990 ж. және 08.08.1999 ж. түсірілген Landsat-7 ғарыштық түсірілімдері бойынша Үлкен Алматы өзен алабында жалпы ауданы 48600 м² болатын 9 көл және 49450 м² болатын 10 көл, ал Кіші Алматы өзен алабында жалпы ауданы 23250 м² болатын 4 көл және 36000 м² болатын 5 мұздықтық-мореналық көлдер анықталды. Ал, 2013 жылдың 6 тамызында түсірілген Landsat-8 ғарыштық суреті арқылы Үлкен Алматы өзен алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің жалпы ауданы 117200 м² дейін және Кіші Алматы өзен алабында 42450 м² дейін өскені белгілі болды. Олардың жалпы саны сәйкесінше 11 және 4 болғандығы анықталды. Sentinel-2 арқылы 2021 жылдың

24 шілдесінде түсірілген ғарыштық сурет бойынша Үлкен Алматы өзен алабында жалпы ауданы 155900 м² болатын 21 көл, Кіші Алматы өзен алабында жалпы ауданы 28500 м² болатын 5 мұздықтық-мореналық анықталды (12а,ә-сурет).



а) саны бойынша өзгеруі; ә) ауданы бойынша таралуы

Сурет 12. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 1978-2021 жж. аралығындағы даму динамикасы

Зерттеліп отырған аумақтағы мұздықтық-мореналық көлдер 1978, 1990, 1999 жж. 3300-3700 м биіктік аралығында таралса, 2013 жылы 3300-3800 м аралығында, ал 2021 жылы 3300-3900 м аралығында дамыған.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің дамуы 1978, 1990, 1999, 2013 және 2021 жылдар аралығындағы ЖҚЗ мәліметтері негізінде ұзақмерзімді заңдылықтардың нәтижесінде қалыптасатыны белгілі болып отыр. Мұздықтық-мореналық көлдерінің саны мен көлемінің ұлғаюын жаһандық климаттың жылынуына байланысты мұздықтардың кейін шегіну процесімен түсіндіруге болады. Мұздықтық-мореналық көлдердің өсуі мен дамуы климаттың өзгеруімен және аумақтың топографиялық жағдайларымен тығыз байланысты [67]. Зерттеу аймағындағы

метеорологиялық бақылау мәліметтері жеткіліксіз болғандықтан, ауа температурасының көпжылдық мәліметтері ашық ресурстағы CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) желісінен алынды. Бұл мәліметтер жергілікті жердің климатының өзгеруін және олардың мұздық-мореналық көлдердің қалыптасуы мен дамуына әсерін бағалау үшін қолданылды. Нәтижесінде, 1978 жылдан 2020 жылға дейінгі ауа температурасының мәліметтерін талдай отырып, оның әрбір он жыл сайын $0,3^{\circ}\text{C}$ -қа көтерілу тенденциясының бар екендігі анықталды. Температураның жоғарылауы мұздықтардың шегінуінің және Іле Алатауындағы мұздық-мореналық көлдердің пайда болуының және олардағы су деңгейлерінің көтерілуі әсерінен зерттеліп отырған аумақта шығу тегі гляциалды сел тасқындары қалыптасуының негізгі қозғаушы күші болып саналады [86].

Демек, Үлкен және Кіші Алматы алаптарындағы мұздықтармен қоректенетін көлдер негізінен мұздықтардың шегінуіне байланысты дамиды және өседі деп қорытынды жасауға болады. Зерттеліп отырған аудандағы мұздық-мореналық көлдердің 97%-ы мұздықтармен қоректенеді, олардың ішінде 13 көл мұздықтармен тікелей байланысты, ал 10 көл мұздықтармен жанама байланыста. Температураның жоғарылауына байланысты мұздықтардың қарқынды шегінуі мұздық ағындының артуына ықпал етеді.

Ғарыштық суреттерді өңдеу нәтижесінде 2021 ж. алдыңғы он жыл бұрынғы жағдаймен салыстырғанда мұздық-мореналық көлдердің саны мен ауданының арту қарқындылығы жоғары дәрежеде байқалды.

Мұздық-мореналық көлдерінің ауданын өлшеу кезінде байқалған орташа қателік 1990 ж. зерттеу нәтижелері үшін 4%, 1999 ж. үшін 3,2%, 2013 ж. үшін 2,6% және 2021 ж. үшін 3,3% құрайды. Қателік периметрге көбейтілген жарты пиксельді қолдану арқылы бағаланғандықтан, кіші мұздық-мореналық көлдер үшін қателік жоғары болды. 1990 жылғы зерттеу мәліметтері үшін пайдаланылған Landsat-5 түсірілімдерінің пиксельдік кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 30 м, 1999 ж., 2013 ж. үшін пайдаланылған Landsat-7,8 түсірілімдерінің пиксельдік кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 30 м, ал 2021 жылғы зерттеу мәліметтері үшін пайдаланылған Sentinel-2 түсірілімдерінің пиксельдік кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 10 м құрады.

Зерттеу нәтижесінде, Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздық-мореналық көлдердің саны артып, морфометриялық сипаттамаларының, соның ішінде ауданы мен көлемінің ұлғаюы байқалды, бұл мұздық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің басымдыққа ие критерийлерінің бірі болып табылады. Көлдердің саны мен ауданының қарқынды өсуі Үлкен Алматы өзен алабына тән. Ал, Кіші Алматы өзен алабында көлдер саны бойынша тұрақтылық орын алса, ауданы бойынша артып жатқандығын көруге болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыстың үшінші тарауында Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарында орналасқан мұздықтық-мореналық көлдердің жай-күйі, морфометриялық сипаттамалары, көл қазаншұңқыры мен жаға динамикасы, мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы және олардың динамикасы 1970 жылдан бастап 2021 дейінгі жылдар аралығын қамтитын фондтық, ведомстволық, мұрағаттық мәліметтері, «Қазселденқорғау» ММ-нің құжаттау мәліметтері және де қашықтықтан зондтау мәліметтері негізінде зерттелді. Сонымен қатар, зерттеу барысында әртүрлі ақпараттық ресурстар, соның ішінде картографиялық мәліметтер, стационарлық, экспедициялық зерттеулердің нәтижелері өңделді. Мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен кеңістіктік-уақыттық өзгерісін бағалау үшін негізгі мәлімет көздері ретінде кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі жоғары және орташа ғарыштық түсірілімдер мен мұздықтық-мореналық көлдердің құжаттамасы пайдаланылды.

Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын, қазаншұңқырының өзгеісі мен жаға динамикасын, мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен даму динамикасын зерттеу өзен алаптарындағы потенциалды қауіптілікті бағалау үшін және гляциалды сел тасқындарының алдын алу үшін маңызды болып табылады. Сонымен қатар, олардың пайда болуы мен одан әрі дамуының негізгі шарттары болып табылатын климаттың өзгеруі, мұздықтық-мореналық кешеннің жай-күйі, көлдерге келіп құятын ағынсулардың гидрологиялық режимін бағалау маңыздылығы айқындалды.

Қорытындылай келе, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, олардың даму динамикасы және қарқындылығы мұздықтардың кейін шегінуімен, яғни климаттың өзгеруімен тікелей байланысты екендігі айқын болып отыр. Сол себепті, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттарын түбегейлі зерттеу, қауіпті экзогендік процестердің алдын-алу мәселелерін шешуде аса маңызды рөлге ие.

4 ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ОРТАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ МҮМКІН БОЛАТЫН АҚТАРЫЛУ ҚАУІПТІЛІГІН БАҒАЛАУ

4.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторлар

4.1.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші климаттық факторлар

Климат – апатты сипатқа ие көптетен табиғи құбылыстарды айқындаушы басты фактор. Климаттың апатты құбылыстарға әсерін негізінен, метеорологиялық элементтердің өзгеруімен байланыстыруға болады. Климаттың өзгеру жағдайында сел белсенділігін болжау үшін климаттық факторлардың рөлін анықтау өте маңызды [87]. Климаттың өзгеруі және мұздықтардың кейін шегінуі Іле Алатауының биік таулы аймақтарында мұздықтық-мореналық көлдердің дамуына, санының артуына және де олардың ақтарылу қауіптілігінің жоғарылауына ықпал етті [80]. 1930-2017 жж. аралығында зерттеу аймағындағы әртүрлі метеостанциялардан алынған мәліметтер бойынша, жазғы кезеңдегі ауа температурасы $0,10-0,26^{\circ}\text{C}/10$ жыл қарқындылығымен өскендігі анықталған [88]. Бұл процесс Іле Алатауының мұздықтар сипатының өзгеруіне әсерін тигізді [89]. Сол себепті, аймақтағы мұздықтардың кейін шегіну процесінің белсенді орын алуы маусымдық және жылдық ауа температурасының өсуімен түсіндіріледі [90].

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігінде пайда болған мореналық көлдердің дамуына, олардың ақтарылу қауіптілігінің туындауына аймақтағы климаттық және гляциологиялық факторлармен қатар, геоморфологиялық шарттар да ықпалын тигізеді.

Гляциалды-нивальды аймақта орналасқан мореналық көлдердің ақтарылуына әсер етуші факторларды зерттеу жұмыстары [1], [91], 1951, 1956 жылдары Кіші Алматы өзені алабында жүріп өткен апатты сел тасқындарынан кейін орын ала бастады. Зерттеулер нәтижесінде биік таулы аймақта орналасқан мореналық көлдердің дамуына, ақтарылу қауіптілігіне аймақтағы гидрометеорологиялық, климаттық, геоморфологиялық факторлар әсер ететіндігі анықталды [92]. Сонымен қатар, дәл осы кезеңде Іле Алатауының мұздықтық-мореналық кешенге ерекше назар аударыла бастады, атап айтқанда, потенциалды ақтарылу қауіптілігі бар көлдердің азотүсірілімдері жүргізіле отырып, Кіші Алматы өзенінің жоғарғы ағысында Тұйықсу мұздықтарының мореналық кешенінде мореналық көлдерді жүйелі бақылау жұмыстары басталды [36]. Ең ірі көлдерде аспаптық геодезиялық зерттеулер жүргізіле бастады. Сонымен қатар, 1973 ж «Қазбасселденқорғау» ММ құрылып, аса потенциалды қауіпті мұздықтық-мореналық көлдерде бақылау бекеттері ұйымдастырылды [14]. Мұздықтық-мореналық кешенге жүргізілген экспедициялық, маршруттық зерттеулер мен маусымдық бақылаулар

нәтижесінде көлдердің және мореналық кешендердің морфометриясы, гидрометеорологиялық және геоморфологиялық жағдайы туралы нақты мәліметтер алына бастады.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі көлдер санының өсуі және дамуы, зерттелініп отырған аудандағы гляциалды сел тасқындарының белсенділігін арттыра түсті. Медеу А.Р. антологиясы бойынша [3] 1950-2021 жж. аралығында Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында 37 гляциалды сел тасқындары жүріп өткен. Осы апатты сел тасқындарының келтірген әлеуметтік және экономикалық шығындары мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер ететін факторларды бағалау қажеттілігін көрсетті.

Болжанған климаттың жылынуы Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі сел белсенділігіне (әрекеттілігіне) айтарлықтай әсерін тигізуі мүмкін. Ауа температурасының 2°C жоғарылауының нәтижесінде климаттық қар сызығы 300-350 м көтеріледі. Бұл өз кезегінде қар мұздықтарының толықтай дерлік жойылуына, сондай-ақ карлық көлдердің пайда болуына жағдай жасайды. Аңғарлық мұздықтардың көлемі айтарлықтай кеміп, мұздық жүйелері ыдырайды. Мұзбасу ауданының кемуіне қарамастан, сел құбылыстарының қалыптасу ықтималдығы мен масштабы артады [93]. Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің ақтарылуы қуатты және апатты гляциалды сел тасқынының қалыптасуына алып келуі мүмкін [2].

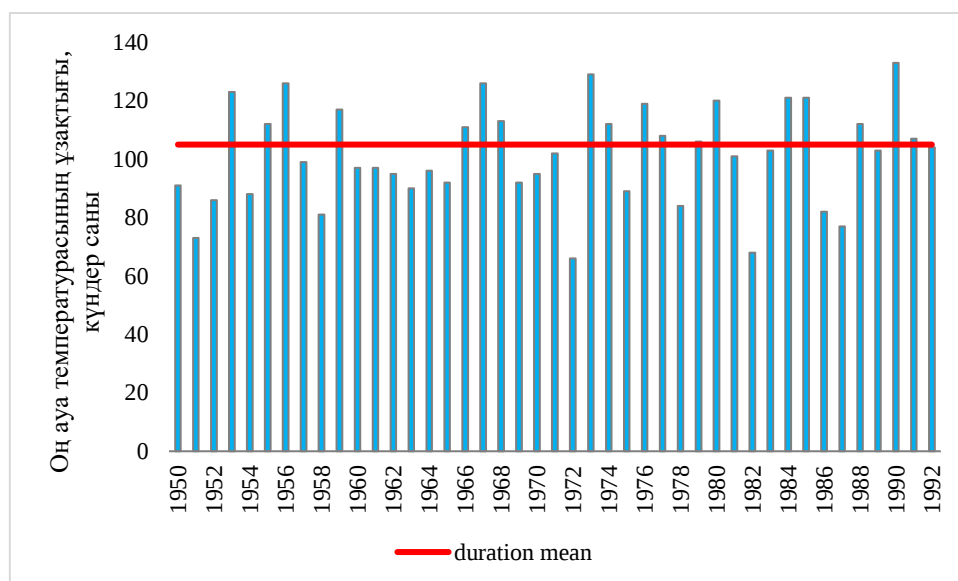
Гляциалды сел тасқындарының қалыптасуына ықпал ететін климаттық факторлардың ерекшеліктеріне – тау жыныстарының физикалық үгілуіне әсер ететін ауа температурасының тәуліктік ауытқулары, сел қауіпті кезеңдегі ұзақ уақыттық мерзімде ауа температурасының оң таңбада көрініс беруі, нөсерлі жауын-шашынның жаууы жатады [4]. Бұл ерекшеліктер Іле Алатауында да белсенді орын алып, мұздықтар массасының кемуіне ықпал етуде [94].

Биік таулы аймақтағы климаттық факторлар мореналық көлдердің ақтарылуына әртүрлі бағытта әсер етуі мүмкін [3]. Біріншіден, жоғары ауа температурасы мұздықтың ағындының ұлғаюы мен термокарстты процесстердің дамуына ықпал етеді. Екіншіден, мұздықтардың физикалық пішінінің өзгеруіне, яғни олардың деформациялануына әкеледі.

Мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне климаттық факторлардың әсер етуін бағалау үшін, зерттеу ауданындағы жүріп өткен гляциалды сел тасқындарының метеорологиялық сипаттамалары қарастырылды. 1950-2021 жж. аралығында Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігінде орналасқан Үлкен Алматы өзен алабында 27, Кіші Алматы өзен алабында 10 гляциалды сел тасқындары жүріп өткен. Сонымен қатар, мониторингтік мәліметтерді талдау нәтижесі зерттеу ауданындағы гляциалды сел тасқындарының маусым-қыркүйек айларында қалыптасатындығын көрсетті.

Зерттеу ауданындағы гляциалды сел тасқындарының қалыптасуы ауа температурасының оң таңбада көрініс беру ұзақтылығымен тығыз байланысты [4]. Сол себепті, Мыңжылқы МС алынған мәліметтер бойынша ауа

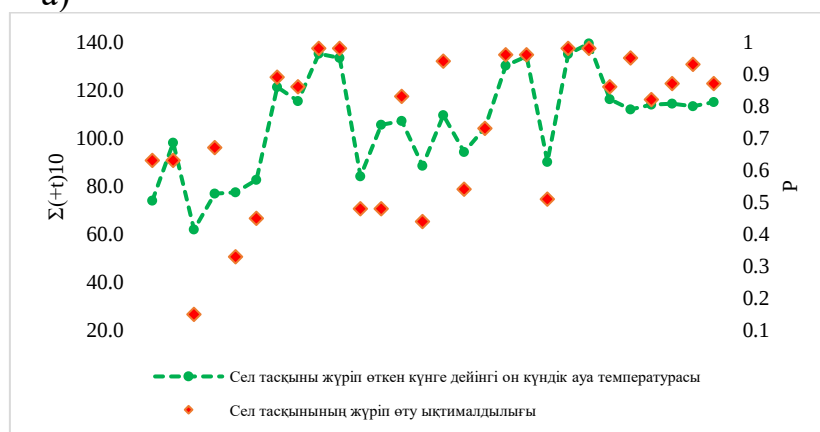
температурасының оң таңбада көрініс беру ұзақтылығына талдау жасалды. Нәтижесінде, ауа температурасының оң таңбада көрініс беру ұзақтығы маусым, шілде, тамыз, қыркүйек айының бірінші декадасына дейін созылып, орташа мәні 106 күнді құрады (13-сурет).



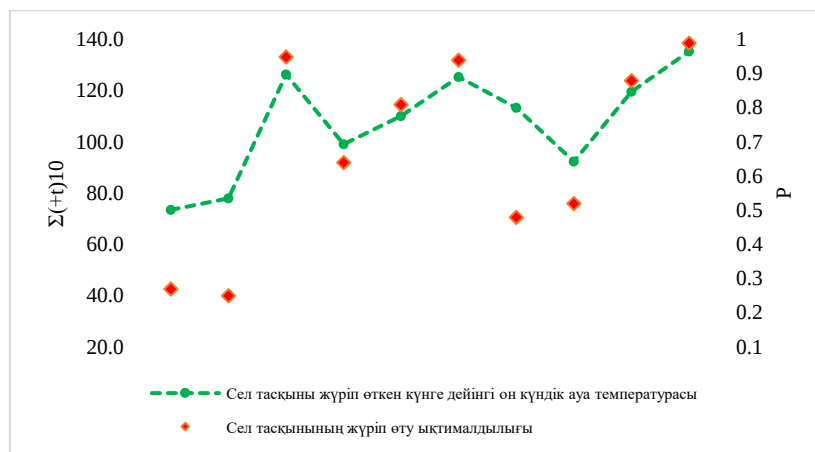
Сурет 13. Мыңжылқы МС бойынша зерттеліп отырған аумақ температурасының оң таңбада көрініс беру ұзақтығы

Гляциалды сел тасқындары жүріп өткен уақытқа дейінгі он күндік ауа температурасының жиынтық мәні сел тасқынның қалыптасу ықтималдығымен байланыстырылды (14а,ә-сурет).

а)



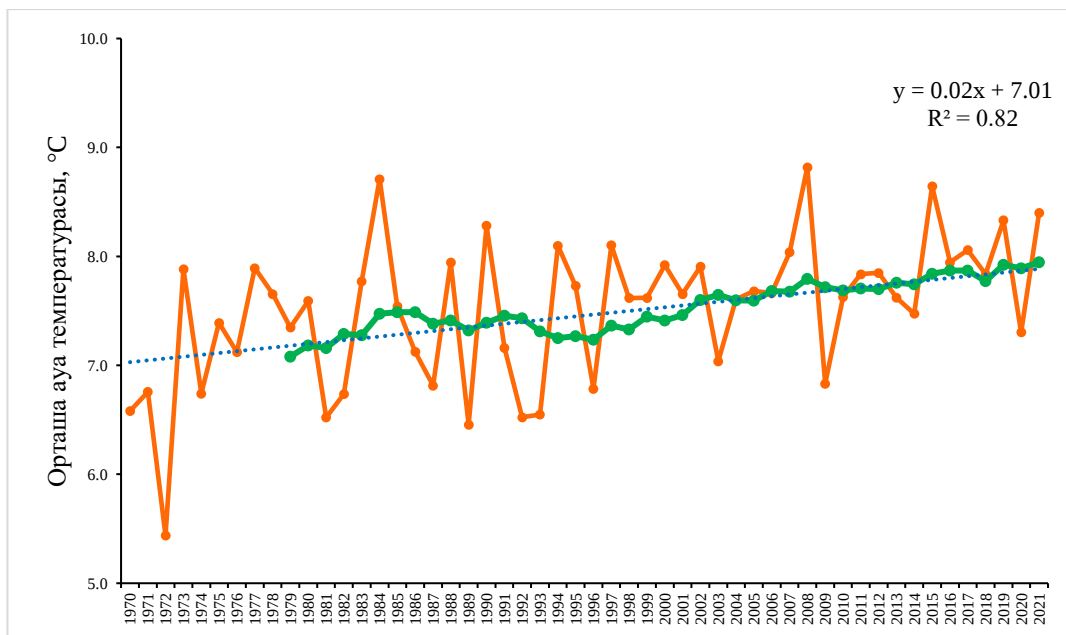
ә)



Сурет 14. Үлкен Алматы (а) және Кіші Алматы (ә) өзен алаптарындағы гляциалды сел тасқыны қалыптасқан уақытқа дейінгі 10 күндік ауа температурасының сел тасқынының қалыптасу ықтималдығымен байланыс графигі

Байланыс графигін талдау нәтижесі он күндік ауа температурасының суммасы 110°C -тан асқан мәнінде сел тасқынының қалыптасу ықтималдылығы 93-99%-ды құрағандығын көрсетті. Гляциалды сел тасқындары орын алған мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне климаттық факторлардың әсерін бағалау үшін, зерттеу ауданында орналасқан Мыңжылқы және Үлкен Алматы көлі МС мамыр-қыркүйек айларындағы ауа температурасының мәндері пайдаланылды.

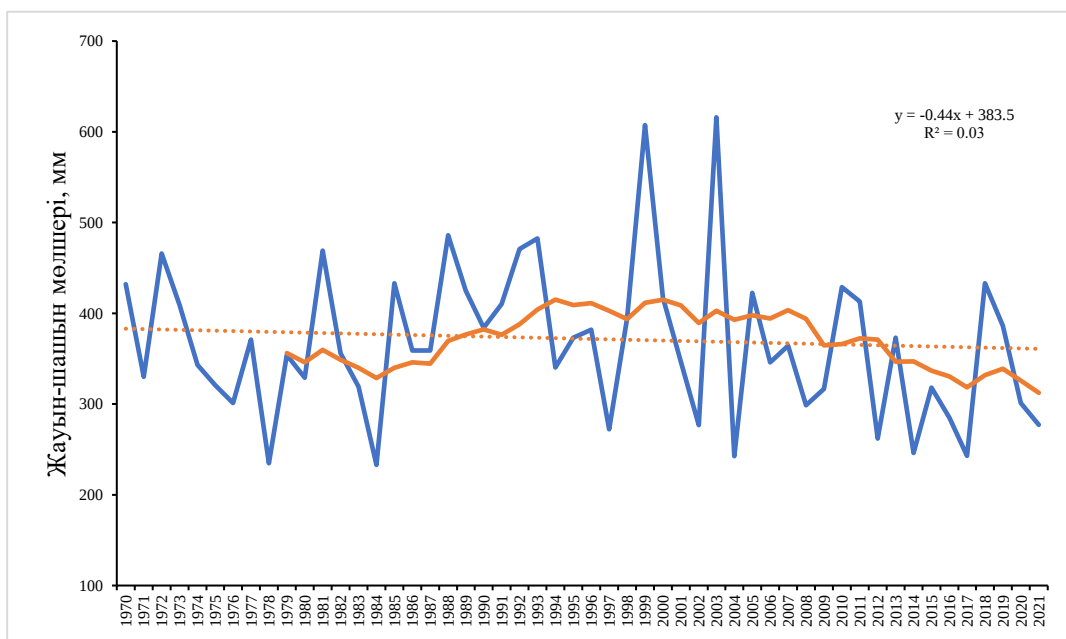
Маусым-тамыз айлары үшін алынған орташа ауа температурасының мәндерінің өсу темпін бағалау мақсатында әрбір 10-жылдық жылжымалы орташалары қарастырылды (15-сурет).



Сурет 15. 1970-2021 жж. аралығындағы Мыңжылқы МС бойынша маусым-тамыз айларының орташа ауа температурасының графигі

1970-2021 жж. аралығында маусым-тамыз айлары бойынша орташа ауа температурасының өзгеру графигі бойынша тегістелген қисық 10 жылдық жылжымалы орташа есеппен алынды. Сызықтық трендтің статистикалық маңыздылығы 82% құрады. Ауа температура көрсеткіштерін талдау нәтижесінде, әрбір он жылда ауа температурасының 0,2°C өскені белгілі болды.

Сонымен қатар, зерттеу ауданы бойынша жауын-шашын режимінің өзгеру қарқындылығын талдау мақсатында маусым-тамыз айларындағы 1970-2021 жж. аралығындағы жауын-шашынның жиынтық мөлшері зерттелді. Талдау нәтижелері зерттеу ауданындағы жауын-шашын мәндері бойынша тенденция көрсеткен жоқ (16-сурет).



Сурет 16. 1970-2021 жж. аралығындағы Мыңжылқы МС бойынша маусым-тамыз айларының жиынтық жауын-шашынның мөлшерінің графигі

4.1.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші жамылғы беттік факторлар

Табиғи және антропогендік әсерлерге байланысты климаттың ғаламдық жылынуы Орталық Азиядағы, соның ішінде Қазақстанның шығыс және оңтүстік-шығысындағы биік таулы және тауалды мұздықтық жүйелерінде өзгерістер туғызуда [95]. Бұл өзгерістердің әсерінен мұздықтар ауданын да, массасын да жоғалтқаны белгілі [96]. В. Айзен зерттеулері бойынша [97] 1970-2011 жж. аралығында Солтүстік Тянь-Шань мұздықтары 14,3% азайған. Оны зерттеу ауданындағы жазғы ауа температурасының 0,44°C-қа көтеріліп, ал жылдық және маусымдық жауын-шашын 3000 м-ден жоғары биіктікке азаюымен түсіндіреді [97]. Ал, Вилесов Е.Н. зерттеулері бойынша [98] 1955-2004 жж. аралығында Солтүстік Тянь-Шань мұздықтары ауданының 40,8%

жоғалып, олардың орташа кейін шегіну жылдамдығы шамамен 3,0 км²/жылына құраған. И.В. Северский мұздықтардың кейін шегіну процесінің ең жоғарғы қарқыны 1973-1991 жж. және 2005-2015 жж. аралықтарына тән және осы аралық мұздық бетінің орта есеппен 0,38 м/жылына азаюына ықпал еткен.

Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтар туралы ең алғашқы сенімді мәліметтер 1940 жж. ортасынан бастап Н.Н. Пальговтың зерттеулерінде [99] көрсетіле бастады. Ол Іле Алатауының солтүстік беткейінде жалпы ауданы 297 км² болатын 194 мұздық бар деп мәлімдеді. Ал, Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтар жүйесінің жай-күйін бақылаудың «бастапқы нүктесі» ретінде 1955 жыл есептеледі [100]. Осы кезеңде зерттеу ауданында тау жоталарының бүкіл макроөңістігін қамтитын аэрофототүсірілімдер алғаш рет жүргізіле бастады. Аэрофототүсірілім (АФТ) нәтижелері алғашқы рет Іле Алатауының солтүстік беткейінде орналасқан мұздықтардың каталогын және 1:100 000 масштабтағы карталарын дайындауға негіз болды. Каталогтау нәтижесінде Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтардың ауданы 33,9 км², ал Кіші Алматы өзені алабы бойынша – 9,3 км² құрады [101]. Сондай-ақ 1979 ж. және 1990 ж. АФТ мәліметтері негізінде зерттеу ауданы үшін екінші және үшінші каталогтар құрастырылды. Каталогтау негізінде 1:25 000 масштабтағы мұздықтардың жаңартылған картасы жасалып, аудандарды анықтаудың дәлдігі 0,01 км² құрады, ал оларды өлшеудегі қателік 2-3%-дан асқан жоқ [95]. Зерттеу нәтижелері Үлкен Алматы өзені алабы бойынша мұздықтардың 25,25 км² және 21,94 км², ал Кіші Алматы өзені алабы бойынша 8,12 км² және 6,34 км² азайғанын көрсетті [101]. Зерттеу ауданы үшін мұздықтардың төртінші каталогы 2008 жылы Ikonos, ALOS, IRS және Landsat ғарыштық суреттерін дешифрлеу негізінде жүзеге асырылды. Зерттеу нәтижелері ірі мұздықтардың кішігірім мұздықтарға ыдырап және бөліктерге бөлінгендігін, яғни мұздықтар санының 307-ден 383-ке дейін ұлғайғанын көрсетті. Ал ауданы бойынша, Үлкен Алматы өзені алабы – 18,08 км², Кіші Алматы өзені алабы 5,62 км² құрады [101].

1955-2008 жж. аралығында Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында мұздықтар жалпы ауданының 15,8 км² (46,7%) және 3,7 км² (39,6%) жоғалтқаны белгілі болды. Зерттеу нәтижелері бойынша мұздықтардың ең қарқынды өзгеріске ұшыраған аумағы ретінде Үлкен Алматы өзен алабы байқалды. Сонымен қатар, 1955-2008 жж. аралығында Іле Алатауы солтүстік беткейінің мұздықтары көлемінің 49,5% жоғалтып, олардың жылдамдығы жылына 0,93% құрады.

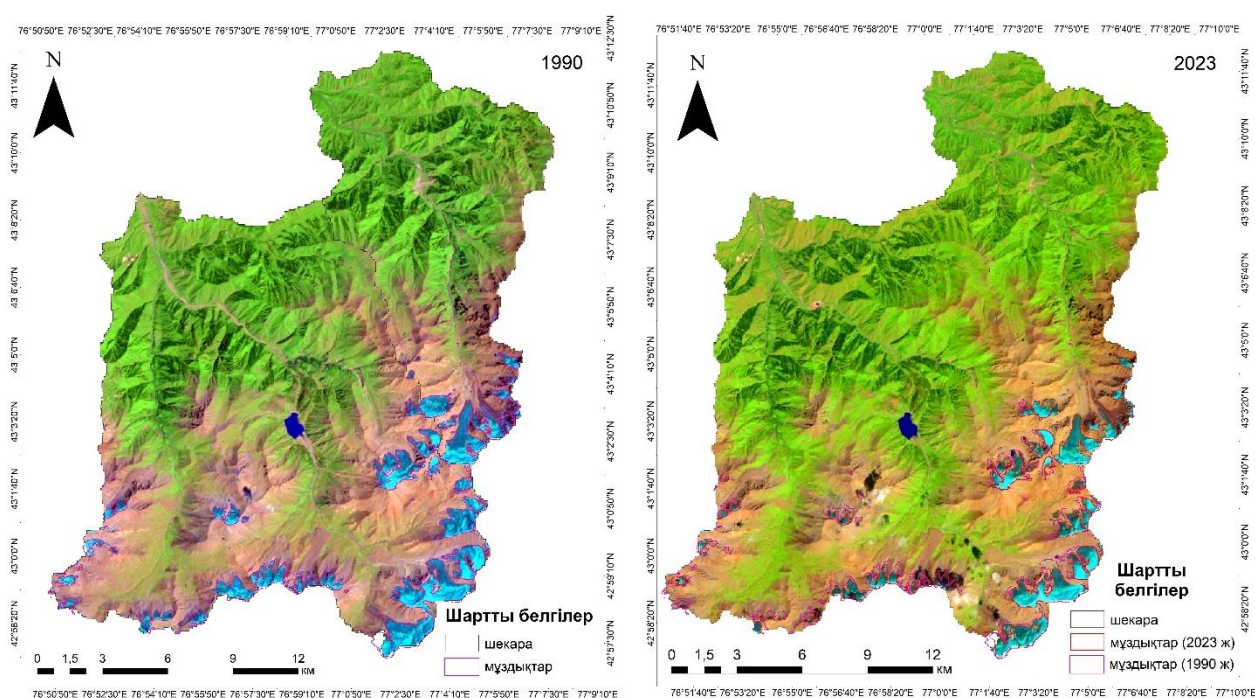
Қарастырылып отырған аумақтағы метеорологиялық бақылаулардың негізінде 2015 ж. ең жоғарғы ауа температурасы байқалған жыл ретінде тіркелді. Алматы қаласы бойынша орташа айлық температура 27,2°C, ең жоғарғысы 37,1°C құраса, 3800 м биіктіктегі шілденің орташа температурасы 5°C, ең жоғарғысы 15°C болды [95]. Осыған орай, 2015 жылдың зерттеу нәтижелері зерттеу ауданындағы мұздықтар саны 318-ге дейін қысқарғанын

көрсетті. 2015 жылы Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтардың жалпы ауданы 162,5 км², ал олардың көлемі шамамен 5,2 км³ құрады [101].

Ал, Мыңжылқы бекеті бойынша соңғы онжылдықта ең жоғарғы ауа температурасы 2022 ж. шілде айында (15,4°C) тіркеліп, шілде айының орташа ауа температурасы 9,6 °C құрады.

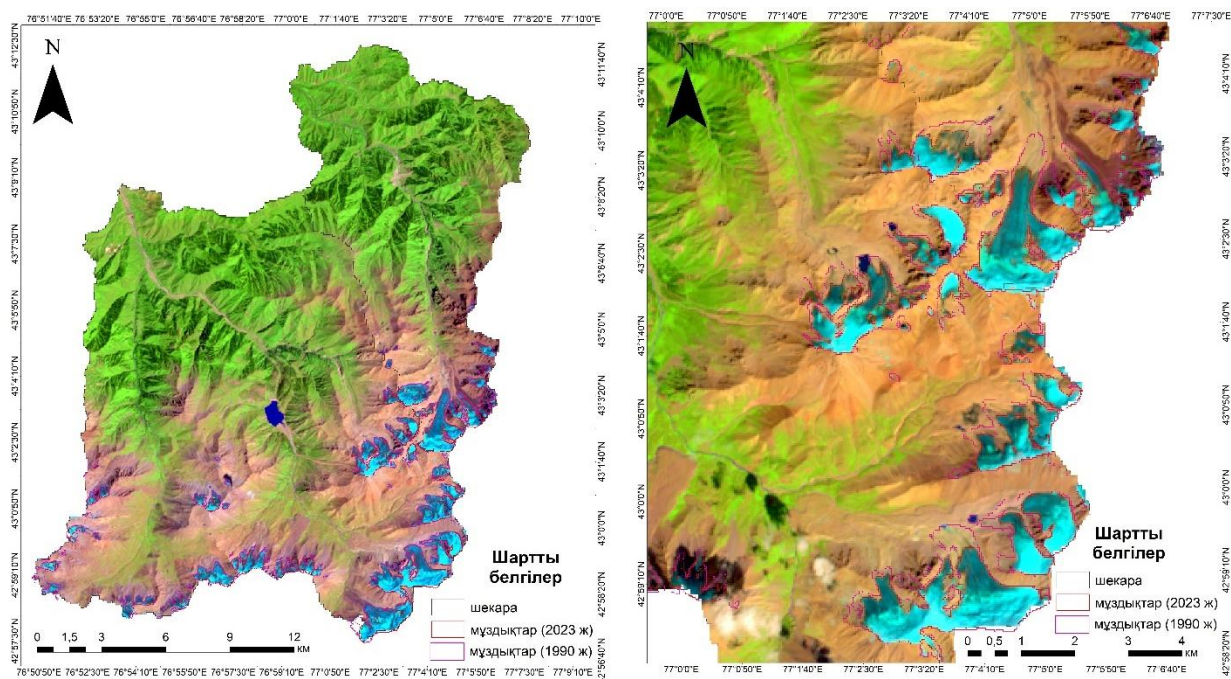
Осылайша, 1955 жж. бастап мұздықтар ауданының кейін шегіну жылдамдығы жылына 0,76% құраса, 1990 жж. бастап оның жылдамдығы 1,13% жетті. Іле Алатауындағы мұздықтардың кейін шегінуі олардың астындағы жас мореналық шөгінділердің жер бетінде көрінуіне алып келді. Бұл жағдай жас мореналардың криогендік және посткриогендік процесстерінің бағыттылығын айтарлықтай өзгертті [98]. Мұздықтардың кейін шегінуімен қатар орын алатын мәңгі тоңды мореналардың жартылай еру процесі, әдетте криогендік жылжымалардың шөгуі нәтижесінде еріген қар, мұз суларымен толтырылған қазаншұңқырлардың пайда болуына әкеледі [98]. Осылайша, жаңа мореналардың түзілуі биік таулы аймақтардағы мұздық-мореналық көлдердің пайда болуына, олардың өсуіне, дамуына жағдай жасап отыр.

Соңғы жылдардағы мұздықтар деградациясының мұздық-мореналық көлдерге әсерін талдау мақсатында Landsat-9 жерсерігінің 10.08.2023 (LC09_L1TP_149030_20230810_20230810_02_T1) түсірілген ғарыштық суреті дешифрленді. Сонымен қатар, Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзені алаптарындағы мұздықтардың кейін шегіну динамикасын бақылау мақсатында дешифрленген сурет 07.08.1990 (LT05_L2SP_149030_19900807_20200915_02_T1) түсірілген Landsat-5 ғарыштық суретімен салыстырылды (17-сурет).



Сурет 17. 1990 ж. және 2023 ж. үшін Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзені алаптарындағы мұздықтардың орналасуы

Зерттеу нәтижелері 2023 жыл бойынша Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтардың ауданы – 13,1 км², Кіші Алматы өзені алабында – 4,2 км² құрады. Мұздықтардың кейін шегіну қарқындылығы 1990 жылмен салыстырғанда 1,1% және 1,0%, зерттеу ауданындағы мұздықтардың кейін шегіну қарқындылығы 1955 жылмен [101] салыстырғанда 0,9% және 0,8% көрсетті (18-сурет).



Сурет 18. 1990-2023 жж. аларылығындағы Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзені алаптарындағы мұздықтардың даму динамикасы

Іле Алатауының орталық бөлігіндегі Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтар шекарасы 1990 ж. бойынша күлгін түспен берілсе, 2023 ж. бойынша мұздықтардың шекаралары қызыл түспен көрсетілді. Мұздықтар ауданының өзгерісін бағалау үшін Landsat жерсерігінің ғарыштық суреттерін пайдалану жақсы нәтижелер берді және есептелген қателік мәні 2-4% аралығын құрады. Мұздықтардың кейін шегінуі мұздық-мореналық көлдердің жаңадан пайда болуына, дамуына, олардың еріген сумен толысуына жағдай жасап, олардың ақтарылу қауіптілігіне тікелей әсер етуші фактор болып табылады.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің пайда болуы және дамуы, олардың ақтарылу қауіптілігі мұздық-мореналық кешеннің жергілікті геологиялық-геоморфологиялық жағдайымен де байланысты.

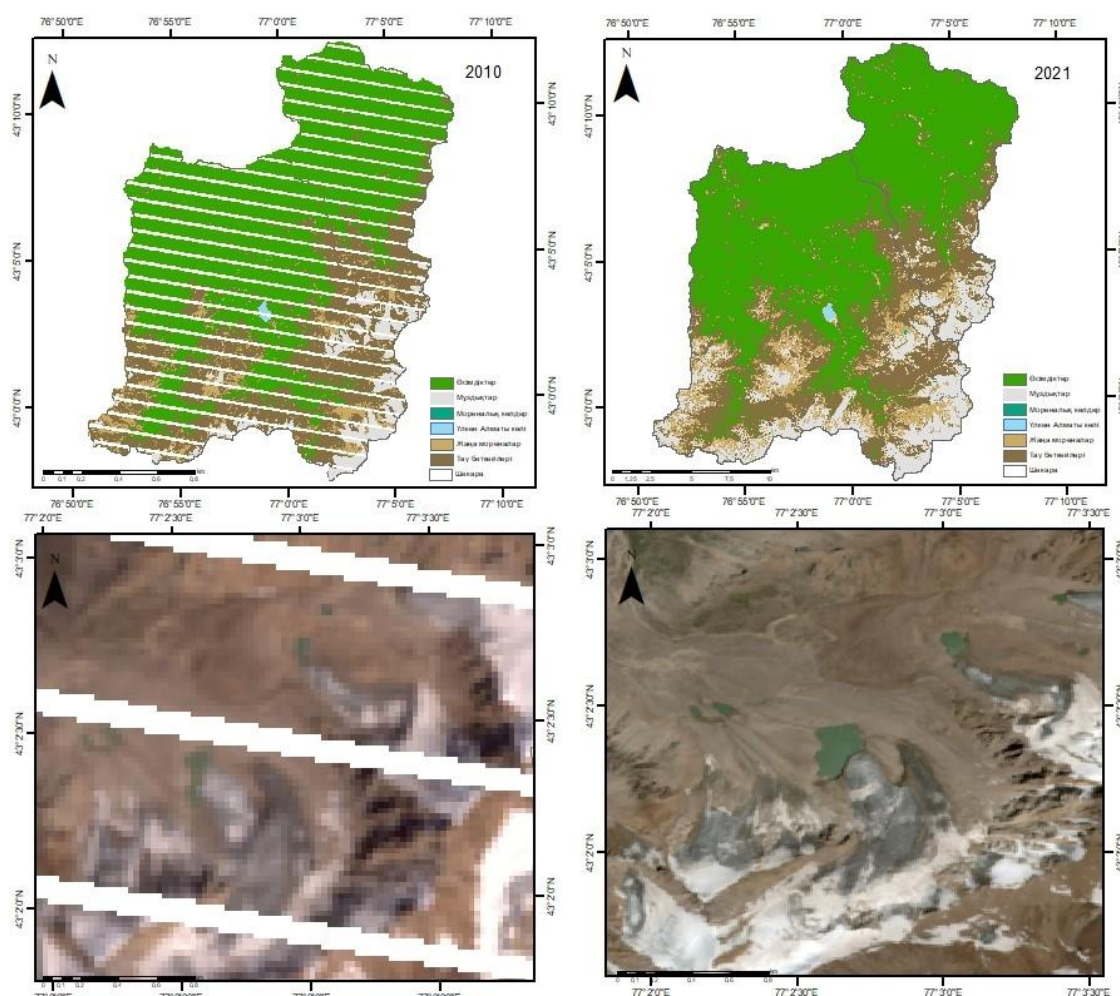
Геоморфологиялық құрылымы бойынша зерттеу ауданы қазіргі экзарациялық морфокұрылымдары анық байқалатын жартасты-мұздық

таулы аймаққа жатады [2]. Бұл аймақ көптеген тас шөгінділерден құралған шыңды жоталармен, қатты жауын-шашынның түсуі және қар көшкінінен кейінгі су қорының жиналуына жағдай жасайтын көптеген цирктер мен карлардың болуымен сипатталады. Карлар негізінен қозғалмалы аңғарлар мен цирктердің баурайларында қалыптасады. Олардың беткейлерінің еңістігі 70-80° құрайды [92].

Сонымен қатар, климаттың жылынуы жағдайында зерттеу аймағындағы мұздықтардың кейін шегінуі, тау жыныстарының үгілуіне әсер ете отырып, жаңа мореналардың мұздықтан босап шығуына және апатты сел тасқынын түзуші бос сынықты шөгінділердің қалыптасуына әкелді [89].

Соңғы жылдары 5000 м-ге дейінгі биіктікте нөлдік изотерманың тіркелуіне байланысты осы аймақта жаңа мореналардың қалыптасуы белсенді жүріп жатыр [4].

Сол себепті, Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық бөлігінің жер бедерінің ландшафты мен жаңа мореналарының кеңістіктік таралуы 2010 және 2021 жылдар арасында салыстырылды. Аймақты фондық салыстыру нәтижесінде, 2010 ж. космостық түсірілім бойынша жаңа мореналардың ауданы 16,9 км² құраса, 2021 ж. олардың ауданы 49%-ға (34,8 км²) өскені белгілі болды (19-сурет).



Сурет 19. а) Үлкен Алматы және ә) Кіші Алматы өзен алаптарының жаңа морена таралған аудандардың өзгерісін фондық салыстыру

Мореналар негізінен құрамында кемінде 0,4% сазды-шаңды фракциялары бар ірі құмнан құралған қиыршықтасты-кесек материалдардан түзіледі. Іле Алатауының мореналарында 2 мм-ден ірі сынықтардан және ұсақ түйіршікті толтырғыштардан (фракциялары 2 мм-ден кіші) тұратын ірі кесекті жыныстар басым болып келеді [2].

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі ландшафттық белдеудің тағы бір геологиялық-геоморфологиялық ерекшелігі бос сынықты шөгінділердің жинақталуы үшін қолайлы жағдайлардың болуы болып табылады. Осылайша, тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері және олардың сипаттамалары геоморфологиялық және климаттық шарттармен өзара байланысты, және де қолайлы шарттар туындаған уақытта лайлы-тасты сел тасқынының қалыптасуына ықпал етеді.

Мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігі көптеген факторлар кешенінің әрекетімен байланысты ұзақ процесс. Сондықтан көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер ететін метеорологиялық және гляциологиялық факторларды ғана емес, сонымен қатар мұздықтық-мореналық кешеннің геологиялық-геоморфологиялық, геоботаникалық жағдайларын да зерттеу қажет. Сондықтан мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер ететін әрбір фактордың рөлін анықтау үшін кешенді зерттеулер жүргізу қажет.

4.2 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігі критерийлері

Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің критерийлері бірқатар шарттарды бағалау арқылы анықталады:

1. Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары
2. Мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу ерекшеліктері, көл қазаншұңқырының типі
3. Мұздықтық-мореналық көлдердің еріген сумен толу, босату режимдері

Көптеген зерттеушілер мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін жоғарыда көрсетілген шарттарды ескере отырып 3 нұсқада қарастырады: ақтарылу қауіптілігі жоқ, потенциалды қауіпті, қауіпті. Көлдердің ақтарылу қауіптілігі бойынша ең алғашқы жіктемелердің бірін В.А. Керемкулов ұсынған. Ол жіктемесінде көлдің гидрологиялық режимін (стационарлық, стационарлық емес), көл қазаншұңқырының генезисі мен морфологиясын (термокарстты, ойпаңды, карстты, бөгелмелі) және көлдің даму кезеңдерін (пайда болуы, даму, жоғалу) ескерген. Алайда, В.А. Керемкулов ұсынған жіктемелерде [8] көл көлемі және байламының тұрақтылығының айқын критерийлері, сондай-ақ сел тасқынының қалыптасу және әлеуметтік-экономикалық зиян келтіру мүмкіндіктері ескерілмеген.

П.А.Плеханов [102] жоғарыда көрсетілген көлдің ақтарылу қауіптілігінің үш нұсқасына «өте қауіпті» критерийін қосады. Бұл санатқа аса қауіпті көлдерді жатқызады, олар ақтарылған жағдайда аймақтық ауқымда төтенше жағдайды тудырып, ерекше ауыр шығындарға әкелуі мүмкін. Ол көлдердің ақтарылу қауіптілігін бағалау критерийлері ретінде көлдің орналасуы (жас моренада, ескі моренада, көне моренада), көлдің даму кезеңі (пайда болуы, дамуы, жойылуы), толысу режимі (тұрақты, маусымдық ауытқулар, күрт маусымішілік ауытқулар), көл сипаттамаларын есепке алған.

А.Р.Медеу [103] көлдердің ақтарылу қауіптілігін бағалау үшін көл қазаншұңқырының генезисін (термокарсты, мұздық маңы-ойпаңды, карлық), көл байламының жай-күйін (монолитті, құрамында қатқан тау жыныстары немесе көмілген мұздықтардың болуы), гидрологиялық режимін (тұрақты, тұрақсыз), ағындының сипатын (жер беті, жер асты), су көлемін ескере отырып әзірлеуді ұсынды. Алайда, А.Р.Медеу жіктемесі бойынша критерийлердің көпшілігінің сапалық сипатта болуы, олардың тәжірибеде қолдану күрделі, яғни сапалық сипаты бойынша көлді бір немесе басқа категорияға ажырату қиындықтар туғызады.

«Қазселденқорғау» ММ мамандары [51] В.А. Керемкуловтың жіктемесін негізге ала отырып, көлдерді ақтарылу қауіптілігі бойынша ақтарылу қауіптілігі жоқ, потенциалды қауіпті, және қауіпті деп 3 нұсқасын ажыратады. Ақтарылу қауіптілігінің негізгі критерийлерінің бірі ретінде көлдегі су көлемі алынған. Ақтарылу қауіптілігі жоқ көлдерге көлемі өте аз немесе тұрақты байламымен ерекшеленетін көлдер жатқызылды. Көлдің байламы берік болса, көлдің ақтарылу ықтималдығы өте төмен болады. Ақтарылу қауіптілігі жоқ көлдер ретінде көлемі 10 000 м³ аз көлдер саналады, бұндай көлемдегі көлдер ақтарылған жағдайда да апатты сел тасқынының пайда болу ықтималдығы төмен болады. Сол себепті, ақтарылу қауіптілігі жоқ көлдерде бақылау жұмыстары жиі жүргізілмейді.

Потенциалды қауіпті көлдерді көлемі 10 000 м³-ден аса отырып, байламы тұрақсыз болып келеді. Көл байламының құрамы көмілген мұздықтардың массивтері және қатып қалған мұздықтары бар бос сынықты топырақтардан тұрады. Бұндай көлдерде алдағы 10 жылдың ішінде апатты сел тасқындарының қалыптасу қауіптілігі бар. Потенциалды ақтарылу қауіптілігі бар көлдер мерзімді аэровизуалды бақылауларды қажет етеді.

Ақтарылу қауіптілігі бар көлдерге тез толысу режимімен ерекшеленетін, жаз айларында су деңгейі тез өзгеріп, көлемі 100 000 м³ асатын, тұрақсыз байламмен бөгелген стационарлық емес көлдер жатады. Аталған көлдерде алдағы бір жылдың ішінде ақтарылу қауіптілігі жоғары және апатты сел тасқыны қалыптасуы мүмкін. Ақтарылу қауіптілігі бар көлдер жиі далалық және аэровизуалды бақылауларды, сонымен қатар алдын ала босату шараларын қажет етеді.

Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін анықтауға талпыныс жасаған зерттеу жұмыстарын талдау нәтижесінде ақтарылу қауіптілігі жоғары дәрежедегі мұздықтық-мореналық көлдердің

салыстырмалы түрде шағын аймақта, әсіресе жас мореналарда орналасатындығы байқалды. Биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін мұздықпен байланысы бар-жоқтығымен де байланыстырады. Попов Н.В. [18] жіктемесіне сәйкес, ол мұздықтық-мореналық көлдердің 4 түрі және 10 кіші типін ажыратады. Олар мұз үстінде орналасқан, мұздықпен жанасатын, мұздықтық-мореналық және мореналық (жаңадан пайда болған және көне мореналарда орналасқан) деп ажыратылады.

Зерттеу барысында жоғарыда аталған көрсеткіштердің барлығын ескере отырып, Үлкен және Кіші Алматы өзені алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің қауіптілік дәрежесін бағалау үшін ЖҚЗ мәліметтері мен ГАЖ технологиялары арқылы көлдің морфометриялық сипаттамаларымен қатар, олардың мұздықпен байланысы және олар орналасқан морена типтері анықталды. Олардың Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзені алаптары үшін келесідей типтері анықталды.

Мұздықтық-мореналық көл қазаншұңқырларының орналасу ерекшеліктері бойынша 2 тип белгіленді:

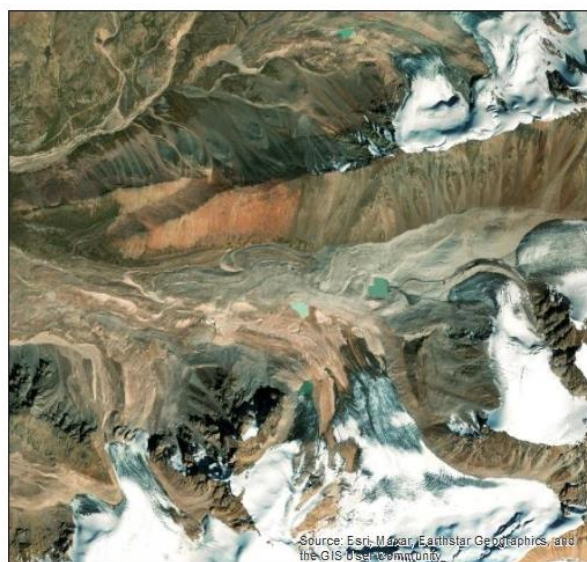
- жас моренада орналасқан көлдер
- көне моренада орналасқан көлдер

Үлкен Алматы өзен алабы бойынша барлық мұздықтық-мореналық көлдер жас моренада орналасқан. Ал, Кіші Алматы өзен алабын бойынша жас моренада орналасқан көлдердің үлесі алап бойынша 83% құраса, көне мореналарда орналасқан көлдердің үлесі 17% құрады (20-сурет).

а)



ә)



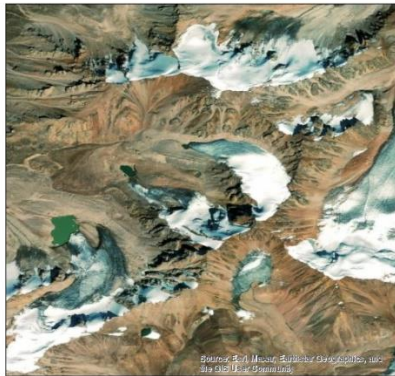
Сурет 20. а) Ескі моренада, ә) жаңа моренада орналасқан мұздықтық-мореналық көлдер

Мұздықтық-мореналық көлдердің мұздықпен байланысының бар-жоқтығын ескере отырып 3 типі анықталды:

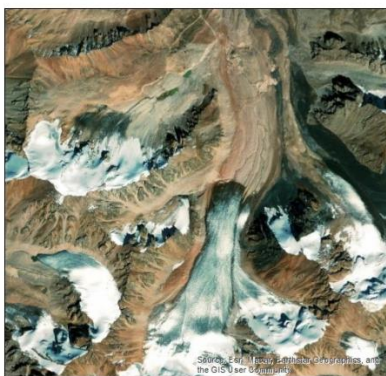
- мұздықпен тікелей байланысы бар
- мұздықпен жанама байланысы бар
- мұздықпен байланысы жоқ

Талдау нәтижесінде Үлкен Алматы өзен алабы бойынша мұздықпен тікелей байланысы бар көлдердің үлесі 62% құраса, мұздықтармен жанама байланысы бар көлдер 38%. Кіші Алматы өзен алабы бойынша мұздықпен тікелей байланысы бар көлдердің үлесі 17% құраса, мұздықтармен жанама байланысы бар көлдер 67%, мұздықтармен байланысы жоқ көлдер 16% құрайды (21-сурет).

а)



ә)

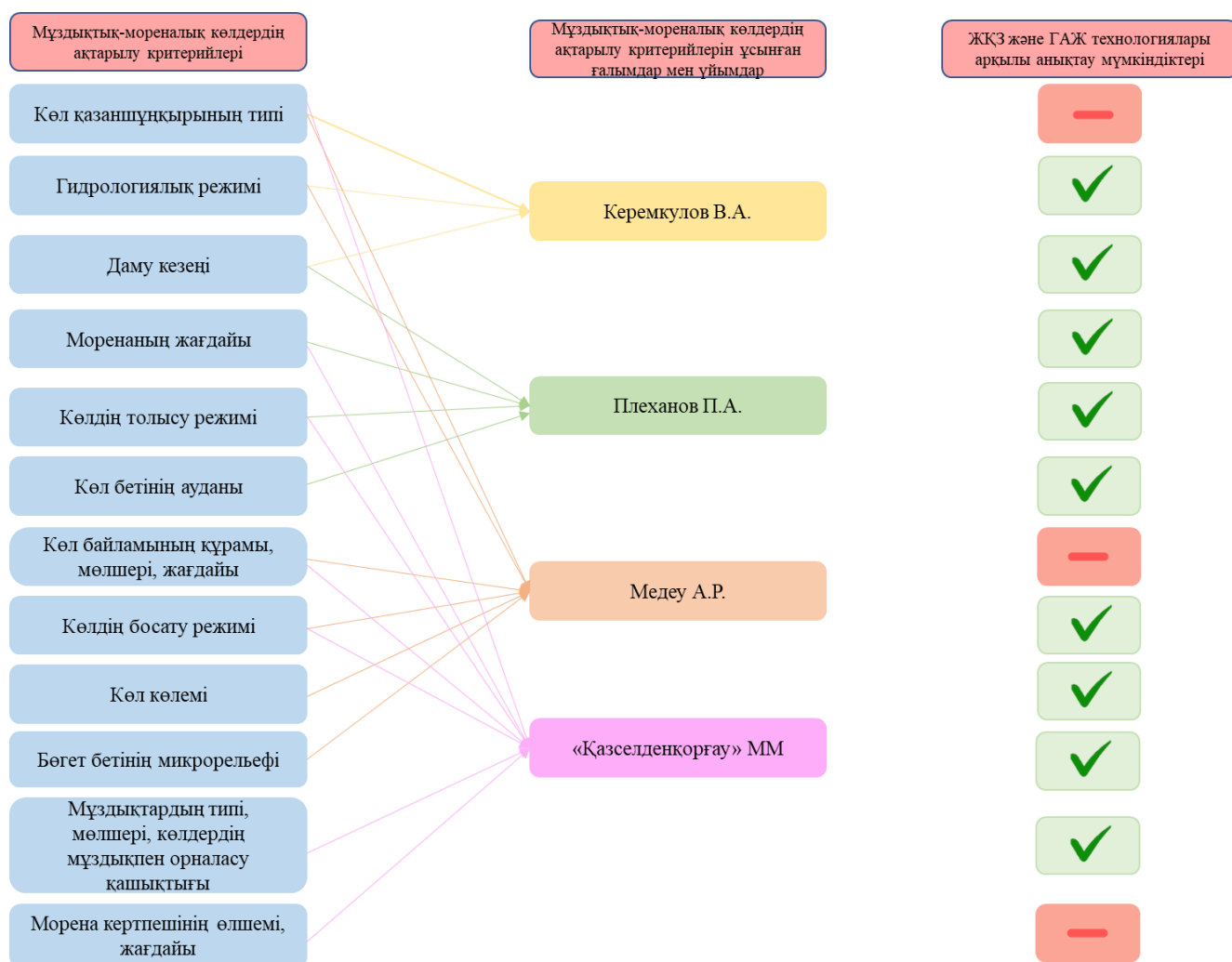


б)



Сурет 21. а) мұздықпен тікелей байланысы бар, ә) мұздықпен жанама байланысы бар, б) мұздықпен байланысы жоқ мұздықтық-мореналық көлдер

Үлкен және Кіші Алматы алабы үшін В.А. Керемкулов, А.Р.Медеу, П.А.Плеханов, Попов Н.В. ұсынған және «Қазселденқорғау» ММ мамандары пайдаланатын критерийлер және олардың ЖҚЗ мәліметтері мен ГАЖ технологиялары арқылы анықталу мүмкіндіктері бағаланды (22 сурет).



Сурет 22 - Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігі критерийлерінің ЖҚЗ және ГАЖ технологияларымен анықталу мүмкіндіктері

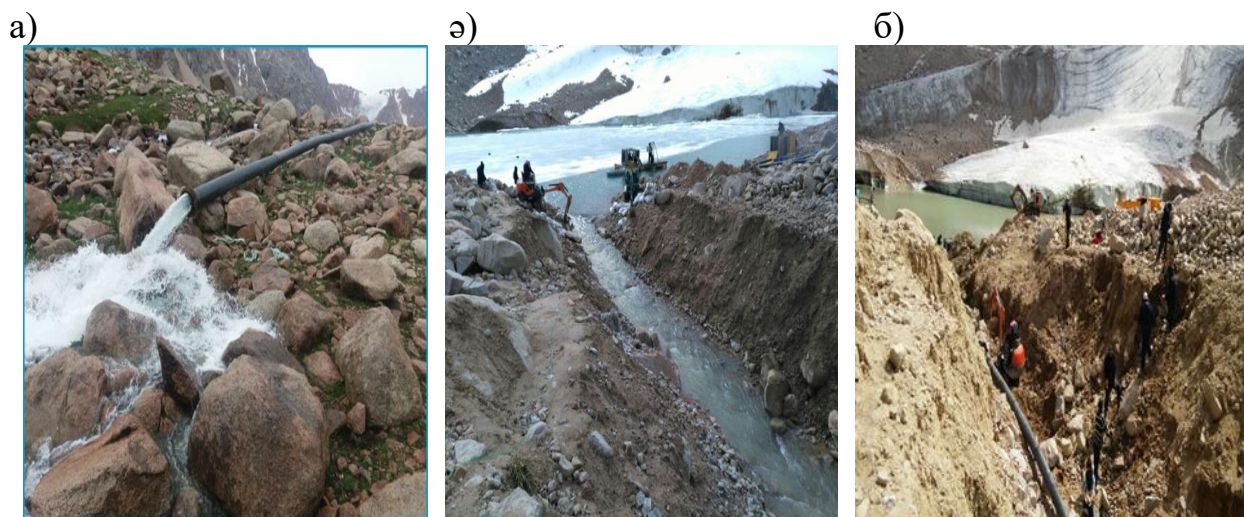
Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін бағалау кезінде жоғарыда келтірілген критерийлерді толықтай ескеруге талпыныс жасалды, дегенмен, мұздықтық-мореналық көлдердің қазаншұңқырының типі мен жағдайын, көл байламының құрамы мен жағдайын, морена кертпешінің жағдайын бағалау диссертациялық жұмыс аясында қолданылған ғарыштық түсірілімдердің орташа және жоғары кеңістіктік кескінделу мүмкіндігіне байланысты мүмкін болмады. Бұл критерийлерді ЖҚЗ мәліметтерінің көмегімен бағалау үшін кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі аса жоғары (2-5 см) ғарыштық суреттер пайдаланылуы қажет. Ал, кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі аса жоғары ғарыштық суреттерді ашық ресурстардан алу мүмкін емес және арнайы рұқсатты талап етеді.

4.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің алдын алу

Мұздықтық-мореналық кешен үнемі өзгеріс үстінде. Бұл өзгерістің негізгі себепшісі мұздықтық-мореналық көлдердің дамуы. Мұздықтық-мореналық көлдегі су көлемінің жыл сайынғы өсу графигі оның ақтарылу қауіптілігінің туындауына әкелетін сипаттамалардың бірі. Көл көлемінің өсуінің қарқындылығы ақтарылу қауіптілігі ықтималдығының жоғарылауын көрсетеді [104]. Соңғы жылдарда мұздықтық-мореналық көлдер сипаттамаларының қарқынды өсуі байқалуда, бұл зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің жоғарылауына ықпал ететіндігі сөзсіз [105].

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің сипаттамаларын бағалай отырып, оның алдын алу, зиянды салдарын төмендету немесе мүлдем болдырмау бағытында жұмыстар жүргізілуі қажет. Елімізде осы бағыттағы жұмыстар көлдерді алдын ала босату шараларын жүргізумен тікелей байланысты [64]. Бұндай жұмыстарды жүргізу еліміз үшін экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімді болып есептеледі.

Алдын ала босату шаралары – көлдің ақтарылу қауіптілігінің пайда болу қаупін азайту арқылы орын алатын жағдайды жеңілдетуге бағытталған ұзақ мерзімді шаралар кешені [36]. Көлдердің морфометриялық сипаттамаларына, көл байламының құрылымына байланысты ақтарылу қауіптілігі бар көлдерді алдын ала босатудың әртүрлі тәсілдері қолданылады. «Казселденқорғау» ММ жетекшілігімен жүргізілетін превентивті жұмыстардың 3 негізгі тәсілі бар – сифондар тәсілі, канал қазу арқылы су жіберу және кешенді тәсіл (23-сурет):



Сурет 23. Мұздықтық-мореналық көлдерді алдын ала босату шаралары - а) сифондар тәсілі; ә) канал-траншеялар қазу арқылы су жіберу тәсілі; б) кешенді тәсіл

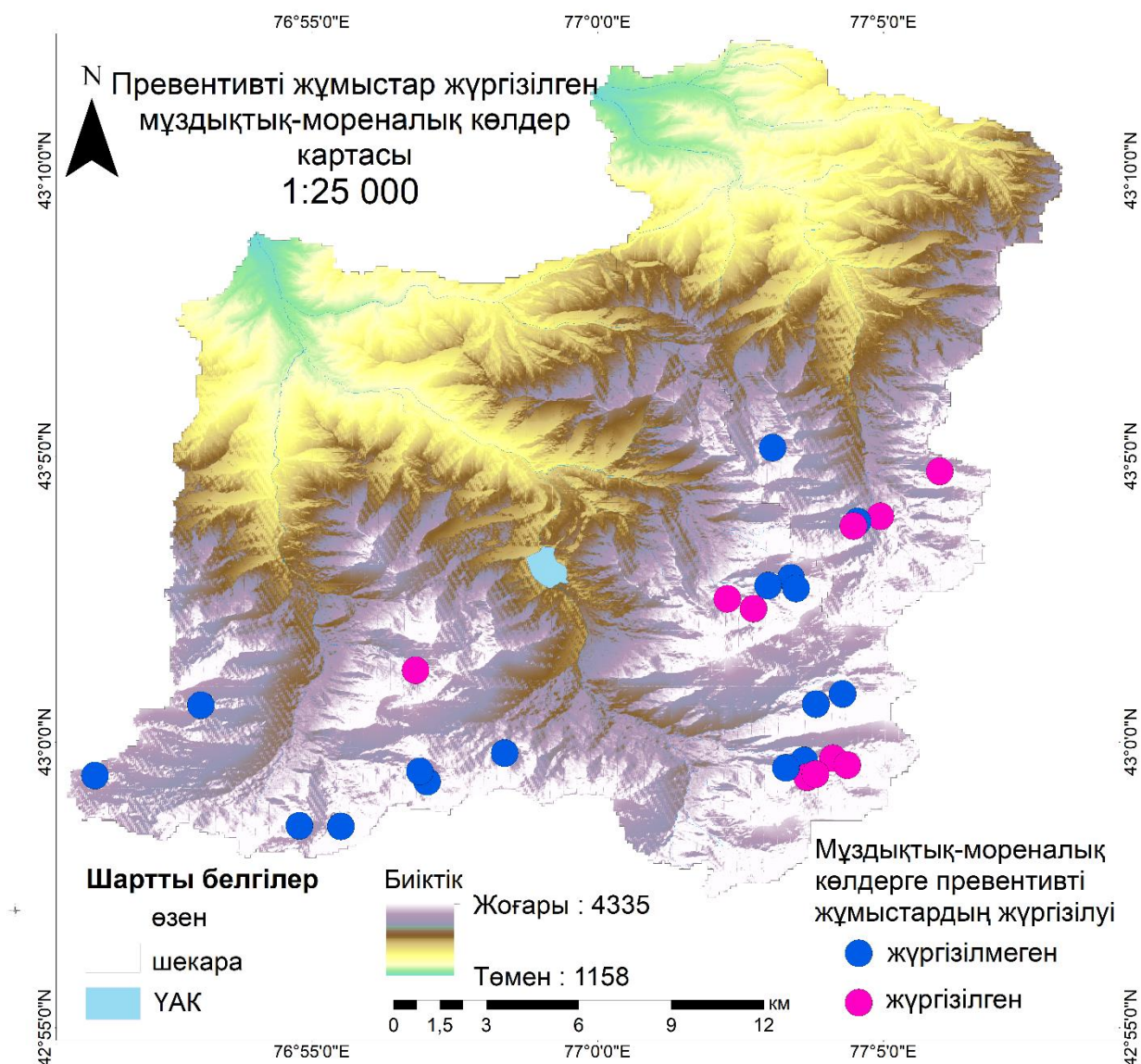
Қазақстанда көлдерді алдын ала босату идеяларын техникалық іске асырудың бастауы ретінде 1964-1966 жылдары Кіші Алматы өзені алабындағы Тұйықсу мұздығының жанындағы №2 көлдегі жұмыстарды есептеуге болады. Мұнда көлдегі су деңгейін төмендету үшін «сифондар тәсілі» қолданылды [36].

Сифондар тәсілі – мұздықтық-мореналық көлден суды айдап шығаруға арналған, оның өнімділігі көл қазаншұңқырына ағып келетін су көлемінен асып кетуі керек. Сифондардың биік таулы аймақтардағы жұмысының теориялық негіздемесі және оларды мұздықтық-мореналық көлдердің суларын дренаждау үшін практикалық пайдалану нәтижелері Е.Д. Дүйсеновтың еңбектерінде [106], [107] келтірілген .

Іле Алатауындағы ақтарылу қауіптілігі бар мұздықтық-мореналық көлдерді алдын ала босату шаралары жоспарлы түрде «Қазселденқорғау» ММ жетекшілігімен 1974-1975 жж. Кіші және Үлкен Алматы өзендерінде жүргізіле бастады. Бұл кезеңде көлдерді судан босату үшін канал-траншеяларды қазу арқылы суды жіберу тәсілі қолданылды [51].

Бастапқыда көлдердің ақтарылу қауіптілігін төмендетуге ашық канал-траншеялар есебінен көл қазаншұңқырының толу көкжиегін төмендету арқылы қол жеткізілді. Көлдердің байламдарында есептік профильдегі және кимадағы эвакуациялық каналдар қазылды [49]. Бұл тәсілді жүзеге асыру үшін геологиялық және басқа жұмыстарда нөсерлі жаңбыр суларын ағызу үшін кеңінен қолданылатын тау арналарын қазу және пайдалану тәсілі аналог ретінде қабылданды. Бұл тәсіл бойынша көл қазаншұңқырында толысқан су дайындалған канал-траншея арқылы жіберіледі. Бір жағынан канал-траншеяның түбінде белгілі бір диаметрлі тастардан жамылғының қалыптасуын, ал екінші жағынан су деңгейінің қауіпсіз белгілерге дейін төмендеуіне немесе көл қазаншұңқырының толық құрғауына кепілдік беретін қауіпсіз өтімдермен су жіберіледі.

Мұздықтық-мореналық көлдер жетуі қиын биік таулы аймақтарда орналасуын және бір далалық маусым шегіндегі мерзімнің шектеулі екенін ескере отырып, канал-траншеяларды ұңғылау бойынша жұмыстарды жеделдету үшін жарылғыш заттарды пайдалану тәжірибесі бар. Жарылғыш заттарды пайдалана отырып, арналарды қолмен қазу немесе бульдозер, гидранттар, бұрғылау құрылғыларды пайдалану арқылы канал-траншеяның пішіндері қалыптасады [51]. Осылайша, превентивті жұмыстардың кешенді тәсілі пайда болды. Аталған тәсіл бойынша жұмыстар ұзақ уақыт бойы жүргізіледі және алдын алу іс-шараларын іске асырудың басты бағыты болып есептеледі. Қазіргі уақытқа дейін мұздықтық-мореналық көлдер толысып, ақтарылу қауіптілігі артқан жағдайда, қауіптіліктің алдын-алу мақсатында «Қазселденқорғау» ММ-мен ұйымдастырылған превентивті жұмыстар уақытылы жүргізіледі (24- сурет).



Сурет 24. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы превентивті жұмыстар жүргізілген және жүргізілмеген мореналық көлдердің орналасу картасы

Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен даму динамикасы бойынша қол жеткізілген нәтижелер Кіші Алматы өзені алабында көл ауданының төмендегенін көрсетті. Ол «Қазселденқорғау» ММ жүргізетін превентивті жұмыстармен түсіндіріледі [34].

Аталған превентивті жұмыстардың нәтижесінде мұздықтық-мореналық көлдердің ішіндегі Алматы қаласы үшін соңғы жылдары ақтарылу қауіптілігін төндіріп отырған, соңғы он жылда аса қарқынды дамуымен ерекшеленген Үлкен Алматы алабының жоғарғы ағысында шоғырланған №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің су деңгейін төмендету мақсатында көлді алдын ала босату шаралары жүргізілуде. №13-бис мұздықтық-мореналық көлі «Советов 2» мұздығының тілінде моренаның жоғарғы кертпешінде Үлкен

Алматы өзенінің оң саласы болып табылатын Құмбел өзенінің жоғарғы ағысында 3554 м биіктікте орналасқан [36].

Зерттеліп отырған көл өткен ғасырдың 90 жж. бастап қалыптаса бастады. 1990-2005 жж. аралығында көл сумен бірқалыпты толысып, көлемі өсе бастады. 2005 жылдан бастап термокарстты процестердің белсенді жүруімен және мұздықтардың кейін шегінуі әсерінен қарқынды дами бастады. 2006 ж. оның жалпы көлемі 70 мың м³ аспаған және ол суға толысқан үш қазаншұңқырлардан тұрды. Бұл көлшіктердің байламы көмілген мұздықтардан тұрғандықтан, мұнда инженерлік жұмыстар жүргізу қиындықтар туғызды. 2007 жылы үш көлшіктің екеуі біріксе, 2008 жылы барлығы бірікті. Сол себепті, 2009 жылы алғашқы бақылау жұмыстары және батиметриялық түсірілімдер жасалып, алдын-алу іс-шаралары жүргізіле бастады. 2010 жылдың аяғында эвакуациялық каналды қазу жұмыстары басталды. Жасалған жұмыстар нәтижесінде су деңгейі 1,7 метрге дейін төмендетіліп, көлемі 149,2-ден 110,0 мың м³ дейін азайтылды. Тасталған су көлемі – 39,2 мың м³ құрады.

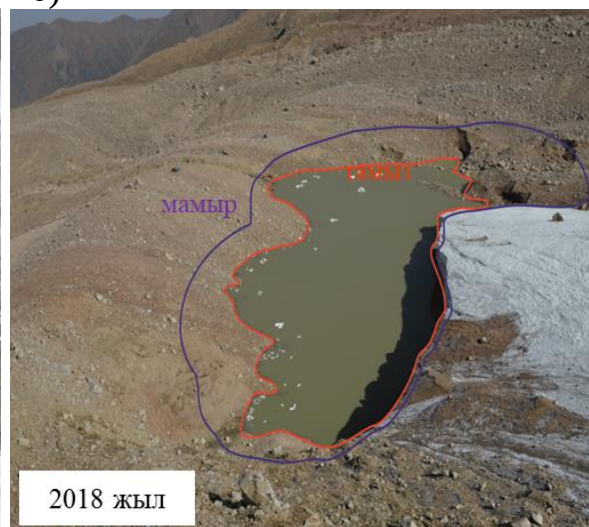
2010-2015 жж. аралығында «Қазселденқорғау» ММ жетекшілігімен ағынды каналын эксплуатациялық қалпында сақтау және көл қазаншұңқырларындағы су деңгейін төмендету мақсатында жыл сайын алдын-алу іс-шаралары жүргізіліп отырды. Осы жылдар аралығында жыл сайынғы тасталынып отырған су көлемін есептемегенде, №13-бис мұздықтық-мореналық көлінің көлемі екі есеге артқан, яғни 149,1-ден 305 мың м³-ке дейін.

2016 жылы көл қазаншұңқырындағы судың бастапқы көлемі 305 мың м³ құрай отырып, алдын-алу іс-шараларын жүргізуді аса талап етті. Сол себепті, жүргізілген іс-шаралар нәтижесінде су деңгейі 7,7 м-ге дейін төмендетілді. Бұл жылғы көлдің көлемі 146,14 мың м³-ті құраса, 2017 жылы 182,3 мың м³-ке дейін өскен. Ал, 2019 жылы 140,0 мың м³ болса, 2020 жылғы жүргізілген іс-шаралар нәтижесінде 126,1 мың м³-ке төмендетілді. Көл деңгейі 697 см-ге дейін түсірілді (25а,ә-сурет).

а)



ә)



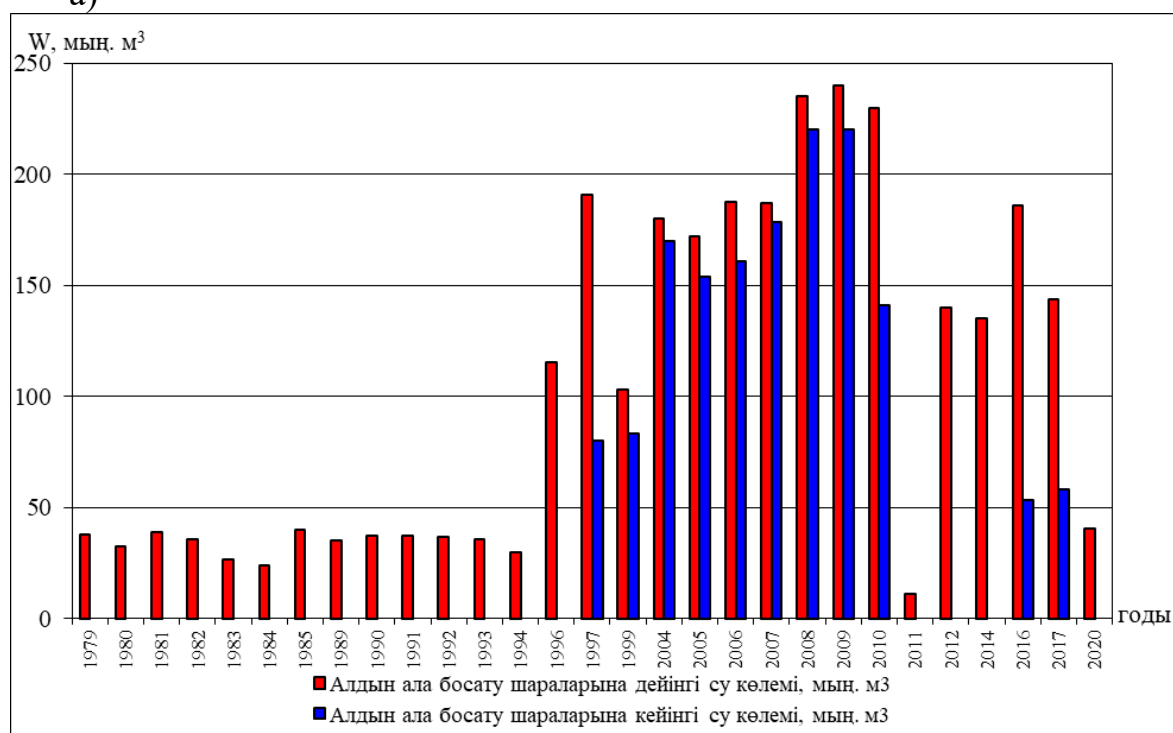
Ескерту: Суреттер «Қазселденқорғау» ММ-нің аэровизуалды бақылау жүргізу барысында түсірілген

Сурет 25 – Үлкен Алматы өзен алабындағы №13-бис мұздық-мореналық көлі а) 2010 жыл, ә) 2018 жыл

25ә-суретінде күлгін түспен көлдің мамыр айындағы шекарасы көрсетілсе, қызыл түспен тамыз айындағы, алдын ала босату шаралары жүргізілгеннен кейінгі көлдің аумағы көрсетілген. 2018 жылы Аталған көлден су тастау жұмыстары 2010 жылдан бастап үздіксіз жүргізіліп келеді. Көлден 2018 жылы 1300 мың, ал 2019 жылы 921,6 мың текше метр су тасталған.

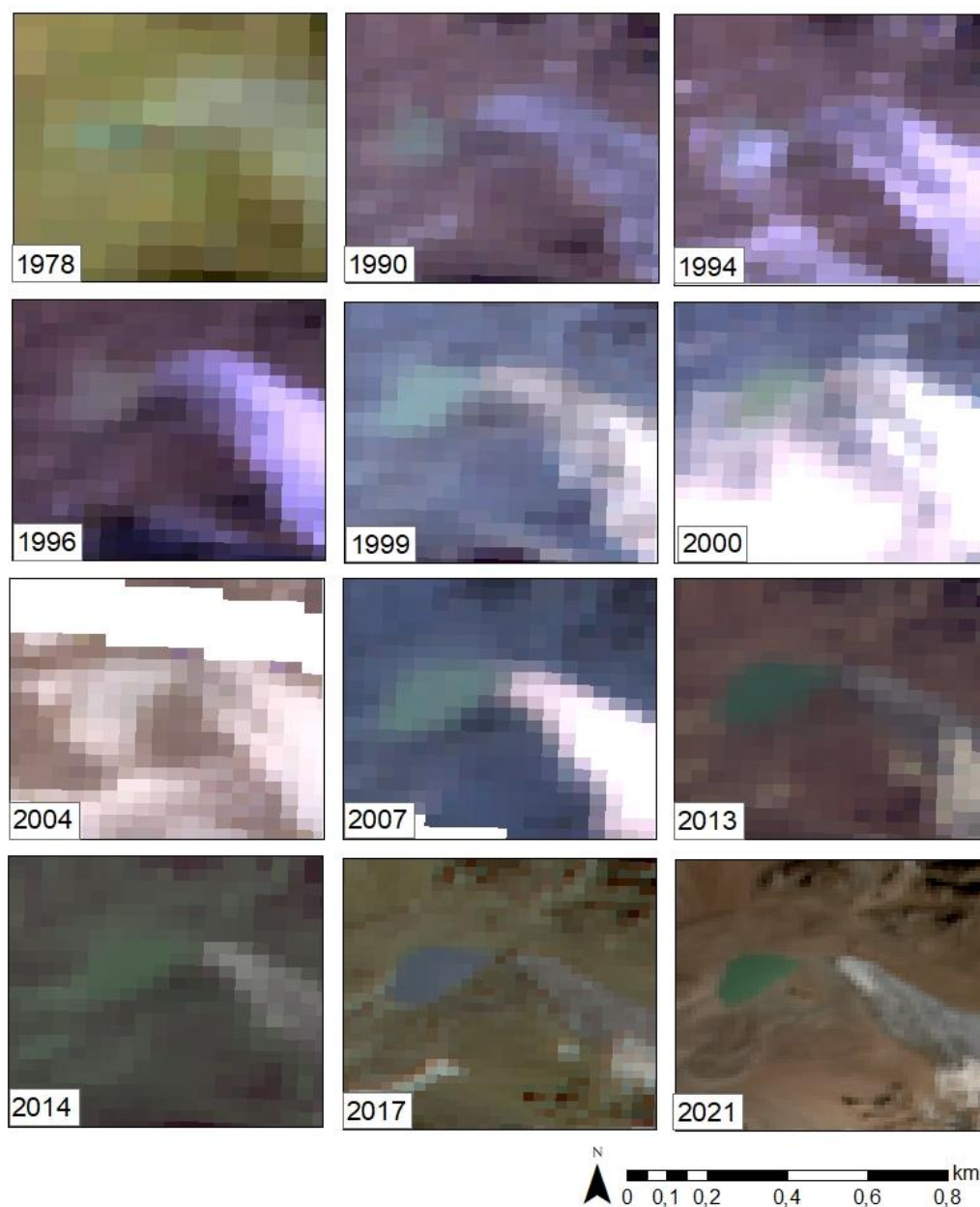
Кіші Алматы өзені алабында №6 мұздық-мореналық көліне алдын ала босату шаралары 1976 жылдан бастап қарқынды жүргізіле бастады. 1976-1978 жж. аралығында көлдегі су деңгейі 3,4 м-ге төмендетілді. 1979 ж. көлдегі су массасының көлемі 37,8 мың м³ құрады. 1996 ж. дейін көлде тұрақтылық байқалса, 1997 ж. бастап алдын ала босату шаралары қарқынды жүргізілген (26а,ә-сурет).

а)



Мәлімет көзі: Медеу А. Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. Алматы, 2011. Т. 1. – 284 с [2].

ә)



Сурет 26. Кіші Алматы өзен алабында орналасқан №6 мұздықтық-мореналық көл мысалында жүргізілген алдын ала бастау шараларының нәтижесі а) «Қазселденқорғау» ММ бойынша ә) қашықтықтан зондау мәліметтері бойынша

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл тарауда Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық бөлігінде орналасқан Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторлар зерттелді. Зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, олардың дамуы және ақтарылу қауіптілігінің туындауы аймақтағы климаттық, гляциологиялық және геологиялық-геоморфологиялық жағдайларға байланысты екендігі белгілі болды. Зерттеу ауданында жаз айларындағы ауа температурасының өсіп жатқандығы байқалды. Алайда, жауын-шашын мәндері бойынша тренд байқалған жоқ. Сонымен қатар, ауа температурасының өсуінен зерттеу ауданындағы мұздықтар кешенінде және геоморфологиялық жағдайында өзгерістер байқалды. Мұздықтар 1990-2021 жж. аралығында 1,1% қарқындылықпен кейін шегінген. Соның нәтижесінде, мұздықтық-мореналық кешенде гляциалды сел тасқынының құраушы факторы болып табылатын бос сынықты материалдардың, яғни жас мореналардың босап шығуына себеп болды. Осылайша, зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторларды зерттеу, гляциалды сел тасқындарының алдын алуда, әлеуметтік және экономикалық шығындарды азайтуда аса маңызды.

Сонымен қатар, Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер ететін критерийлер талданды. Осы кезеңге дейінгі ғалымдар ұсынған критерийлер тізбектеліп, оларды ЖҚЗ мәліметтері және ГАЖ технологиялары арқылы анықтау мүмкіндігіне баға берілді.

Сондай-ақ, Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің алдын алу мақсатында жүргізілетін шаралардың маңыздылығы талданды. Нәтижесінде, жүргізіліп жатқан алдын ала босату шаралары сел тасқынының алдын алуда, экономикалық, әлеуметтік шығындарды азайтуда аса маңызды рөлге ие екендігі анықталды. Алайда, зерттеу ауданында алдын ала босату шаралары уақытылы жүргізіліп отырғанның өзінде, зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің саны мен ауданының артып жатқандығын ескерген жөн.

Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары бойынша мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігін төмендету мақсатында «Қазселденқорғау» ММ жетекшілігімен превентивті жұмыстар қарқынды жүргізілуде. Мұздықтық-мореналық көлдерді бақылау және бағалау үшін, олардың ақтарылу қауіптілігінің алдын алу үшін превентивті жұмыстарды жүргізудің кешенді әдістері пайдаланылады. Метеорологиялық мәліметтер негізінде жасалған өңдеу нәтижелері көлдердің ақтарылу қауіптілігі климаттық факторлармен тығыз байланыста екендігін көрсетті. Дегенмен, уақытылы жүзеге асырылатын превентивті жұмыстар байланыс тығыздығын төмендетті.

5 ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ОРТАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ ӨЗЕН АЛАПТАРЫНЫҢ СЕЛ ҚАУІПТІЛІГІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ЗОНАЛАУ

5.1 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі сел қауіптілігін тудыратын және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтаудағы критерийлерді бағалау

Сел тасқындары Қазақстанның шығыс, оңтүстік-шығыс және оңтүстік бөлігіндегі таулы аудандарда көрініс беретін қауіпті құбылыстардың бірі [4], [103]. Сел тасқындарының қауіптілігінің дәлелі ретінде оның аталған аудандарға әкелетін зиянды салдарын келтіруге болады. Қазақстандағы сел тасқындары Антологиясындағы келтірілген мәліметтерге сүйенсек, сел тасқындары кезінде шаруашылық объектілерге нұқсан келетіндігі, тіпті адам өлімі де орын алатын жағдайлардың тіркелгендігі жөніндегі мәліметтерді келтіруге болады [3]. Оған қоса, еліміздегі сел қалыптасу және оның әсер ету аймақтары шамамен 164 мың км² құрайтындығы, оның ішінде Алматы облысына тиесілі сел қауіпті ауданның 11 мың км² алып жатқандығы [36] адамның тіршілік етуі мен шаруашылық жүргізуіне қолайлы жерлердің аталған апатты құбылыстың әсер ету зонасының қауіптілік дәрежесін арттыра түседі.

Климаттың өзгеруі жағдайында мұздықтардың кейін шегінуі нәтижесінде биік таулы аудандардағы жаңа мореналардың босап шығуы, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы және олардың қарқынды дамуы, көл байламының тұрақсыздығы зерттеу ауданындағы гляциалды сел қауіптілігін арттыруда [15], [44], [56], [108], [109]. Оның үстіне, климаттың ғаламдық жылынуы негізінде биік таулы аймақтағы нөлдік изотерманың жоғарылауы есебінен нөсерлі генезистегі сел тасқындарының бос сынықты материалдардың мол қоры жинақталған аумақтарда көрініс беру ықтималдығы нөсерлі селдердің қауіптілігін еселей түспек [14]. Осылайша, Іле Алатауының орталық бөлігіндегі елді-мекендер, шаруашылық объектілер мен инфрақұрылым түрлері потенциалды қауіп аймағының тікелей реципиенттеріне айналды.

Сол себепті, таулы және тауалды аудандардың қарқынды игеріліп, адамның шаруашылық іс-әрекетінің әсер ету қарқыны мен ареалының артуына байланысты, сондай-ақ селден қорғану мақсатына салынған имараттардың тозуына немесе болашақта күтілетін сел тасқындарына төтеп бере алмайды деген қауіптердің [64], [110] болуына байланысты сел қауіптілігі, сел тасқындарына ұшырайтын аудандар және сел қауіпі жөніндегі ұғымдарды саралап, солардың негізінде қарастыралатын аудан картасының жаңа нұсқаларын жасау қажеттілігі туындады [14].

Қазақстанда сел қауіпін зерттеу және оны басқару, бағалау мәселелері Медеу А.Р. жетекшілігімен «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ-да көтеріліп, жалғасын тауып келеді. «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ-да жүзеге асқан алғашқы зерттеу жұмыстары шеңберінде сел

тасқындарының әсер ету қаупін бағалаудың әдістемесі әзірленді [38], [52], [111].

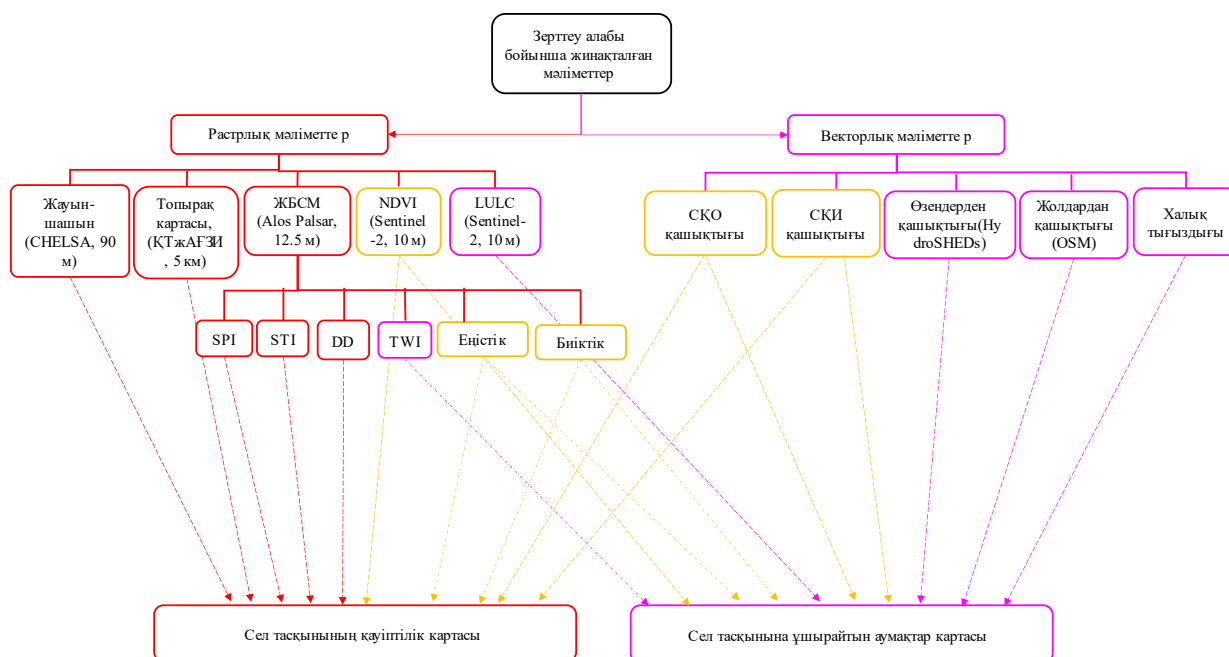
Сел тасқындарының әсер ету қаупін бағалаудың әдістемелік негіздері табиғи қоршаған ортаға әсер ету қаупін бағалау әдістерін, қауіпсіздік теориясы (секьюритология), жүйенің тұрақтылық теориясы, рискология, менеджмент әдістерін жаратылыстану ғылымдары негізінде синергетикалық тәсілді қолдану арқылы дайындалған [41]. Осы уақытқа дейін сел құбылысына қатысты қауіптілік және қауіп ұғымдары негізінде Қазақстанның сел қауіпті аудандарына XX ғасырдың 70 жж. аяғынан 80 жж. дейін белсенді зерттеу жұмыстары жүргізілді [1], [103]. Зерттеулер нәтижесінде сел тасқынының қалыптасуына әсер етуші гидрометеорологиялық, геологиялық, геоморфологиялық факторлар анықталып, сел ошақтары мен сел тасқынының пайда болу механизмдері жіктелді [2]. Сонымен қатар, А.Р. Медеу, Н.Ф.Колотилин зерттеулерін ғылыми талдау негізінде апатты сел тасқындары сипаттамаларын қауіптілік дәрежесі бойынша типтерге жіктеді. Сел қауіпті аудандарды типтеу 3 негізгі факторлар бойынша жүзеге асырылды, олар I – сел қалыптасуының табиғи факторлары, II – сел тасқындарының генетикалық және динамикалық сипаттамалары, III - процестің энергетикалық көрсеткіштері. Әзірленген типтеуді негізге ала отырып, 1989 ж. алғашқы рет Қазақстанның таулы және тауалды аудандарының сел қауіптілік дәрежесін фондық бағалау мақсатында карталар жасалды (Колотилин Н.Ф. и др., 1989). Сел қауіптілік картасын әзірлеу барысында сел қауіпті аудандағы жүріп өткен сел тасқынының көлемі, сел өтімі, сел қайталанғыштығы, сел тасқынының энергетикалық класы, жер сілкінісінің әсер ету күші, (балл есебімен) сияқты факторлар ескеріле отырып, сел қауіптілігі 5 дәреже бойынша көрсетілді [38]. 1996 ж. ҚазҒЗГМИ жүргізген зерттеулерде аумақтың сел қауіптілігі сел ошақтарының және сел алаптарының сандық сипаттамалары, фильтрация коэффициенттерінің мәндері, жауын-шашынның тәуліктік қабаты немесе мореналық көлдің ақтарылу мүмкіндігі, сел тасқындарының өтімі және көлемі, селдің тығыздығы және генезисі бойынша типі негізінде бағаланып, нәтижесінде ҚР аумағының сел қауіптілік картасы жасалды [112]. Кейінірек бұл жұмыстар жалғасып, ҚР-ның төтенше жағдайларының табиғи және техногенді қауіптіліктері мен қауіптері Атласында жарық көрді [38]. Атап айтқанда, Қазақстанның таулы және тауалды аудандарының 1:7 500 000 масштабындағы сел қауіптілік картасында сел тасқындарының таралу дәрежесі орналасу биіктігі (м есебімен), еңістік (° есебімен), сел ошақтарының таралу коэффициенті, жауын-шашынның жылдық суммасы (мм есебімен) критерийлерінің негізінде 5 категорияға жіктелді. Жекелеген тау жоталары мен таулы аудандарына арналған 1:1 500 000 масштабтағы сел қауіптілік картасында жүріп өткен сел тасқындарының өтімдері ($\text{м}^3/\text{с}$ есебімен), сел тасқындарының қайталанғыштығы (жыл есебімен) және сел алаптарының алып жатқан ауданы (% есебімен) көрсеткіштері негізінде сел қауіптілігі бағаланды. Ол өз кезегінде жүріп өткен сел тасқыны көлемінің (млн. м^3) көрсеткіштері негізінде Іле және

Күнге Алатауы үшін 1:350 000 масштабында нақтыланды. Сел қауіптілігін бағалау жұмыстары мұнымен шектелмейді. Мысалы, [2] жұмысында кваллиметриялық әдіс негізінде 1:100 000 масштабта Іле Алатауының орталық бөлігі үшін сел қауіптілігінің картасы жасалған. Ол үшін сел тасқындарының қалыптасу орны болып табылатын сел ошақтары мен селдік арналар, сел тасқындарының жүріп өту зонасын толықтай қамтитын сел ошақтары мен селдік арналардың су жинау алаптары, сонымен қатар сел тасқындарының жайылу немесе тоқтау зонасын алып жатқан ысырынды конус объектілері айқындалып, олардың әрқайсысының өзіндік сел қауіптілік көрсеткіштері анықталды. Атап айтқанда, сел ошақтары мен селдік арналар 10...1000 м³/с және одан жоғары сел өтімдері мен қайталанғыштығы 10 жылдан 100 және одан да көп аралықты қамтитын уақыт бойынша, сел ошақтары мен селдік арналардың су жинау алаптары сел қауіптілік дәрежесі және сел қалыптасу ықпалында болатын аудандар бойынша, ысырынды конус селдік арнаның сел қауіптілік дәрежесі және селден қорғану имараттарының бар-жоқтығы бойынша сел қауіптілігінің 6 дәрежесіне жіктелген болатын. Сонымен қатар, сел қауіптілігін бағалау мақсатында 1:50 000 масштабына дейін нақтыланған Үлкен және Кіші Алматы алаптарының картасы дайындалды [113]. Оны дайындау барысында сел арналарына селдің әсер ету зоналарына және ысырынды конустарға баса назар аударылды және олар көлемі және қайталанғыштығына байланысты 4 (сел арналары мен селдің әсер ету зоналары) және 3 (ысырынды конустар) категорияға жіктелді. Бұл картаның ерекшелігіне қауіпті алапта орналасқан мореналық-мұздықтық көлдердің ақтарылу жағдайындағы сел тасқынының белгілі бір учаскелерге ағып жету уақытының есептелуін жатқызуға болады. Барлық карталарға тән белгі олардың өткен сел тасқындарының есептік сипаттамаларға басшылыққа ала отырып жасалуында. Алайда, нивалды зонадағы мореналық кешеннің үнемі өзгеріс үстінде болуына байланысты, аумақтың сел қауіптілігін жүріп өткен сел тасқындарының сипаттамалары арқылы бағалау климаттың ғаламдық жылыну жағдайында орын алып жатқан өзгерістердің үстемеленуі аясында өзектілігін жоғалтып отыр [114]. Сол себепті, гляциалды және нөсерлі сел тасқындарының қалыптасуы жағдайында сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды, сел қауіпін алдын-алу және одан қорғануды тиімді жоспарлау үшін зерттеу аумағын кешенді бағалау қажеттілігі туындады [114]. Қазіргі таңда, потенциалды сел қауіптілігін бағалау мақсатында ГАЖ технологияларының, Жерді қашықтықтан зондау мәліметтерінің жылдам, әрі уақытылы шешім қабылдау мақсатында пайдаланылу аясы артуда [49], [55]. Сол себепті, Іле Алатауының орталық бөлігінің сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырауы мүмкін аумақтарын анықтау үшін ГАЖ негізіндегі мультикритериялық әдіс қолданылды [115], [116].

Сел тасқындары көп факторлы процесс болғандықтан, олардың қалыптасуы бірнеше факторлардың қабаттасып орын алуы нәтижесінде көрініс береді [14]. Зерттеу аумағындағы сел қалыптасуына ықпал ететін факторларды талдау арқылы сел қауіптілігін айқындаушы басты критерийлер

таңдалды (27-сурет). Әрбір критерийдің сел қауіптілігіне әсер ету үлесі аналитикалық иерархиялық процесс әдісі көмегімен анықталып, ГАЖ бағдарламасы ортасында оверлейлік талдау құралы көмегімен өңделді.

Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды және аумақтағы потенциалды қауіптілікті бағалауға қажетті картографиялық, қашықтықтан зондтау, статистикалық, далалық зерттеу және әдеби мәліметтер қолданылды (2-сурет). Зерттеулерді жүргізу үшін, ең алдымен, кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі жоғары, біздің жағдайымызда 12,5 м-ге тең жер бедерінің сандық моделі пайдаланылды (ASF Data Search, w.p.). Зерттеу ауданындағы жер беті жамылғысы мен жерді пайдалану шарттарын бейнелейтін Sentinel-2 жолсеріктесінің 2021 жылдың түсірілімі бойынша өңделген кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі 10 м болатын [118] суреттер талданды. Сел қауіпті кезеңдегі жауын-шашын жиынтығының мәндері CHELSA ғаламдық климаттық базасынан [119], [120] алынды. Көлдердің таралуын айқындау мақсатында қолданылған NDWI (Normalized Difference Water Index) және аумақтағы өсімдік жамылғысының сандық және сапалық көрсеткішін анықтайтын NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) индекстеріне талдау жасау үшін 2021 жылы 24 шілдеде түсірілген кеңістіктік кескіндеу мүмкіндігі 10 м болатын Sentinel-2 ғарыштық түсірілімі пайдаланылды [121]. Зерттеу ауданындағы топырақ жамылғысының құрамы мен механикалық құрылымы «Ө.О.Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты» ЖШС-і әзірлеген Жетісу алабының 1:500 000 масштабтағы топырақ картасы арқылы анықталды [122]. Зерттеу алабындағы су объектілері мен инфраструктура кешенінің векторлық қабаттары HydroSHEDs [123] және Open Street Map коммерциялық емес веб-картографиялық жобасынан жүктеліп алынды [124]. Сел ошақтарының зерттеу ауданындағы биіктік бойынша үлестірілуі [45] алынды. Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы халықтың орналасу тығыздығы Алматы қаласының цифровизациялау басқармасымен жасалған [125] «Алматы қаласының халық тығыздығы» картасынан алынды. Сонымен қатар, имараттардың орналасу координаталары, Алматы қаласының Төтенше жағдайлар департаментінен алынды [126].



Сурет 27. Сел тасқынының қалыптасуына әсер ететін критерийлердің тізімі

5.1.1 Сел қауіптілігіне әсер етуші факторларды талдау негізінде айқындалған критерийлер

Зерттеу ауданындағы сел қалыптастырушы факторларды талдау нәтижелері сел қауіптілігінің негізгі критерийлерін және олардың әсер ету деңгейлерін анықтауға мүмкіндік берді. Әрбір критерий ArcGIS 10.8 бағдарламасында өңделіп, олардың сел қауіптілік дәрежесі бойынша зерттеу ауданы 5 зонаға: аса жоғары (5), жоғары (4), орташа (3), төмен (2), өте төмен (1) бөлінді.

1. Сел қауіпті объектілерден қашықтығы. Бұл критерийдің қауіптілік дәрежесін анықтау үшін зерттеу алабындағы мореналық көлдердің және сел ошақтарының саны мен орналасу координаталары анықталды.

1.1 Көлдерден қашықтығы (Distance from moraine lakes). Мұздықтық-мореналық көлдер мұздану процесі байқалатын биік таулы аймақтарда кездеседі [127]. Сел қауіптілігінің туындауына негіз болатын басты фактор олардың ақтарылуы. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қаупі оның морфометриялық сипаттамаларына, көлдегі жиналған су көлеміне, сонымен қатар көл байламы мен оны көмкеріп жатқан тау жыныстарының механикалық құрамына тәуелді [128]. Ал, мұндай жағдайлар зерттеу ауданындағы бірқатар мореналық көлдерге тән. Сол себепті, мореналық көлдерден қашықтықты ЖҚЗ және ГАЗ технологияларының көмегімен анықталған мұздықтық-мореналық көлдердің координаталарына байланысты анықталды.

Мореналық көлдерден алыстаған сайын, гляциалды сел тасқындарының қалыптасу ықтималдылығының төмендеуіне байланысты қауіптілік дәрежесі төмендейді. Ал, сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау кезінде,

калыптасқан гляциалды сел тасқындарының есептік параметрлерінің, әсер ету дәрежесінің артуына байланысты қауіптілік дәрежесі арта түседі [3]. Мысалы, 15.07.1973 ж. Кіші Алматы өзен алабында №2 және №3 көлдердің ақтарылуы нәтижесінде қалыптасқан сел тасқынының сел өтімі 10 км-ден кейін 7-10 мың м³/с құраған. Ал, Б.С. Ниязов и А.С. Деговец [129], [130] жекелеген тұстамалар бойынша сел өтімінің келесі мәндерін береді: «Мыңжылқы» тұстамасында – 324 м³/с; «Тұйықсу қақпасы» тұстамасында (2,5 км бұзылымнан төмен) – 2300 м³/с, «Сарысай» тұстамасында – 3200 м³/с; «Медеу» сел қоймасына кіре беріс жердегі тұстамада – 5180 м³/с.

1.2 Сел ошақтарынан қашықтығы (Distance from mudflow centers). Зерттеу ауданында гляциалды сел тасқындарымен қоса, нөсерлі сел тасқындары да жиі көрініс береді [4]. Аталған аумақта қалыптасқан сел тасқындарының 80%-дан астамы нөсерлі генезистегі сел тасқындарының үлесіне тиесілі [34]. Бос сынықты материалдардың едәуір қоры бар және еңістік мәндері 10-55° аралығын құрайтын учаскелер – сел ошақтары сел қауіптілігін бағалауда аса маңызды [1], [2], [4]. Сел ошақтарынан алыстаған сайын, нөсерлі сел тасқынының қалыптасу ықтималдылығы төмендеуіне байланысты, қауіптілік дәрежесі де төмендейді. Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау кезінде, қалыптасқан нөсерлі сел тасқындарының есептік параметрлері мен әсер ету дәрежесінің төмендеуіне байланысты қауіптілік дәрежесі төмендей түседі. Мысалы, 08-09.07.1950 ж. Үлкен Алматы өзен алабында нөсер жаңбырдың жаууы нәтижесінде қалыптасқан сел тасқындарының өтімдері келесідей болған: ең жоғары сел өтімі – 1160 м³/с, «Құмбел-саға» тұстамасында – 1000 м³/с шамасында, Аюсай өзені бойынша – 300 м³/с, Алматы қаласы маңында – 100–120 м³/с жуық [3].

2. Жауын-шашын (Precipitation). Жауын-шашын мөлшері сел тасқыны қауіптілігінің жоғарылауына әсер ететін тағы бір фактор. Жауын-шашынның таралуы тек аумақ бойынша ғана емес, сонымен қатар биіктік белдеу бойынша әркелкі [131]. Бұған ылғал тасымалдаушы ауа массаларының жолында батыстан шығысқа қарай созылған тау жоталарының табиғи шекара түзуі септігін тигізеді [132]. Жауын-шашынның биіктік бойынша таралуы аумақтағы нөлдік изотерманың өзгерісіне тікелей тәуелді. Мысалы, Кіші Алматы өзен алабындағы нөлдік изотерманың 4500 м биіктікте байқалуы кезінде жауын-шашынның ең жоғары мөлшерінің өзгеруі мардымсыз және бұл өз кезегінде қуатты сел тасқындарының қалыптасуына ықпал етеді [2]. Жауын-шашын мөлшерінің биіктік бойынша өзгеруінің басты себебі тау беткейлеріндегі атмосфералық факторлардың әрекеттілігі, сондай-ақ термикалық және динамикалық фронттардың күшеюі арқылы түсіндіріледі [64]. Сонымен қатар, жауын-шашынның түсуі өзен ағындысының жоғарылауына және термокарстты процестердің қарқынды көрініс беруіне алып келеді. Зерттеу аумағының метеорологиялық станциялармен нашар қамтылуына байланысты, жауын-шашын мөлшерінің мәндері CHELSA мәліметтер базасынан алынып, өңделді.

3. Топырақ жамылғысы (Soil). Сел тасқынының тығыздығы мен сел массасы көлемінің негізгі құраушысы болып табылатын топырақтардың гранулометриялық және минералогиялық құрамы сел қауіптілігіне әсер ететін факторлардың бірі болып табылады [14]. Топырақ грунттарының инфильтрациялық және фильтрациялық сипаттамалары жауын-шашын түсуімен бірге айтарлықтай дәрежеде ағынды сипатын анықтайды [133]. Инфильтрациялық сипаты төмен және жауын-шашын түсу қарқыны жоғары болған жағдайда беттік ағынды өтімдерінің шекті мәннен асып түсуіне және эрозиялы-ығыспалық құбылыстардың туындауына алып келеді [134]. Инфильтрациялық сипаттамалары жоғары және толассыз жауған жауын-шашын топырақ грунттарының қалың қабатының ылғалдануын қамтамасыз етіп, ығыспалы сел құбылыстарының көрініс беруіне жағдай жасайды, ал олардың толықтай сумен қанығуы тізбекті сел процестерінің жандануына алып келеді. Зерттеліп отырған аумақ бойынша топырақ жамылғысын сел қауіптілігін анықтау мақсатында бағалау 1:500 000 масштабтағы Жетісу алабының топырақ картасы [122] арқылы жүзеге асырылды.

4. Биіктік (Elevation). Биіктік белгілері немесе жер бедері сел қалыптастыру процесінде маңызды рөл атқарады. Эрозиялық процестер нәтижесінде түзілген бедердің теріс пішіндері сел тасқындарының пайда болуы және даму ошағы болып табылады. Сондай-ақ, сел тасқындары өте қатты ылғалданған бос сынықты массалардың ығысуы нәтижесінде бедердің оң пішіндерінің шегінде қалыптасуы мүмкін. Зерттеліп отырған аумақ геоморфологиялық тұрғыда [1], [2], [103] жіктемесіне сәйкес 4 белдеуге бөлінген: а) 1000-1700 м аралығында тілімдену дәрежесі әртүрлі аласа таулы; ә) 1600-2900 м аралығы қарқынды тілімденген орташа таулы; б) 2800-3300 м аралығы таулы құрылымдарының мұздықтық және қарлы өңделген қалдық пішініндегі тік беткейлі биік таулы; в) 3200-3400 м, 5000 м дейін жартасты-мұздықты биік таулы. Қазіргі уақытта 2800-3300 м аралығын қамтитын белдеу жас регрессивті эрозияның даму аумағы және селдің қатты материалдармен негізгі қоректену учаскесіне айналуға. Биік таулы белдеудің геологиялық және климаттық факторларының геоморфологиялық факторларымен біріккен жиынтығы мұнда жаппай көп мөлшердегі сынықты материалдар жинақталуын айқындап қоймай, сонымен қатар тасқын энергиясының анағұрлым жоғары көрсеткіштеріне ие болып келетін селдердің қалыптасуын қамтамасыз етеді [135]. Сондықтан да, биіктік белгілерін қауіптілік дәрежесі бойынша жіктеу кезінде, аталған белдеу «аса жоғары» категория ретінде танылды. Сәйкесінше, қауіптілігі жоғары, орташа, және төмен категориялар 3200-3400 м, 5000 м дейін, 1600-2900 м, 1000-1700 м аралықтарын қамтыды. Биіктік белгілері жөніндегі зерттеу аумағына қатысты мәліметтер кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі 12,5 м құрайтын жер бедерінің сандық моделі негізінде ALOS PALSAR мәліметтер базасынан алынды.

5. Еңістік (Slope). Сел тасқындары бос сынықты материалдардың еңістік арқылы сұйық күйде орын ауыстыруымен байланысты. Сондықтан да, сел тасқынының қауіптілігін және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды

анықтау кезінде еңістік мәндерінің маңызы зор [136]. Сондай-ақ, сел тасқындары «су – бос сынықты материал – еңістік» жүйесінің тепе-теңдігі бұзылуы нәтижесінде, яғни аталған параметрлердің бірінің шекті мәннен асып түсу жағдайында туындайтындықтан, сел қауіптілігін анықтауда бұл параметрдің рөлі жоғары екендігін атап өткен жөн. Еңістіктің мәні жоғары болған сайын, сел тасқынының жылдамдығы, тығыздығы артып, сел тасқынының биіктігі (деңгейі) жоғарылай түседі. Степанов Б.С. және Яфязова Р.К. зерттеулері [14] бойынша сел тасқындары жиі қалыптасатын орташа және биік таулы белдеудегі (2200-3400 м) еңістігі ең жоғары аумақтар қарастырылып отырған Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарына тиесілі. Еңістіктің қауіптілік дәрежесі анықтау үшін 12,5 кеңістіктік кескіндеу мүмкіндігіне ие ALOS PALSAR ЖБСМ-і қолданылды.

6. Ағын қуатының индексі (Stream power index). SPI - ағынсудың эрозиялық күшінің өлшемі болып табылады [137]. Бұл өлшем қандай да бір топографиялық беттегі потенциалды су эрозиясын сипаттау үшін қолданылады. Су жинау алабының ауданы және еңістік мәндері жоғарылаған сайын, жоғарыдан төмен қарай келетін су мөлшері мен олардың жылдамдығы да арта түседі. Сол себепті, арна маңы эрозияға ұшырап, бос сынықты материалдардың едәуір мөлшері ағын арқылы тасымалдана отырып, ағын қуаты индексі мен эрозия қауіпінің артуына алып келеді. Ағынның қуаттылық факторын бағалау арқылы су қорының бос сынықты материалдармен араласу аумақтары анықталып (5), зерттеліп отырған аудан қауіптілік дәрежесі бойынша зоналарға бөлінді.

$$SPI = \ln(A \cdot \tan \beta) \quad (5)$$

мұндағы, А – су жинау алабының меншікті ауданы, β – еңістік градиенті.

7. Бос сынықты материалдардың тасымалдану индексі (Sediment transport index). Сел тасқыны процесіне арнадағы грунттың қатты бөлшектерін немесе сел массасының, сондай-ақ оның құраушыларының шөгуімен сипатталатын сел қоспасының арналық қозғалысы деген анықтама берілген [138]. Мур және Берч [139] сипаттаған бос сынықты материалдардың тасымалдану индексі - арна маңындағы эрозияға ұшыраған және бос сынықты материалдардың шоғырланған аумақтарын сипаттайды. Бос сынықты материалдардың тасымалдану индексінің ең жоғары мәндері тік беткейлер мен су жинау алабының эрозияға ұшыраған төменгі бөліктеріне тән [140]. Ал бұл индекстің төмен мәндері шөгінділердің баяу қозғалысын сипаттайды, сол себептен де, шөгінділердің жинақталуы өсімдік жамылғысына бай, су жинау алабының жоғарғы бөлігіне тән. Бұл индекс ландшафт эрозиясын жақсы сипаттайды, сондықтан бос сынықты материалдардың биік таулы аумақтан су шаятын және шөгінділер жинақталатын ауданға шоғырлануын көрсетеді. Бос сынықты материалдардың су жинау алабы бойынша тасымалдануына гравитация, еңістік және шөгінділердің шоғырлануы сияқты факторлар әсер етеді (6):

$$STI = (m + 1) \times (A / 22.13)^m \times \sin(\beta / 0.0896)^n \quad (6)$$

мұндағы, A - су жинау алабының меншікті ауданы, β – жергілікті жердің еңістігі, m – аудан үлесінің көрсеткіші, әдетте, ол 0,6-ға тең, n – еңістіктің құлау көрсеткіші, ол, әдетте, 1,3-ке тең.

8. Өзен желісінің жиілігі (Drainage Density) - алаптағы өзен желісі ұзындығының алап ауданына қатынасы (D , км/км²). Бұл критерий аудан шегіндегі гидрографиялық желінің даму дәрежесін көрсетеді. Өзен желісінің жиілігі жауын-шашынның мөлшеріне, геологиялық құрылымына, жер бедеріне, топырақ пен өсімдік жамылғысының сипатына байланысты [141]. Өзен желісінің жиілігі топырақтың инфильтрациялық қабілеті төмендеген сайын жоғарылайды [142]. Өзен желісінің жиілігі жоғары аудандар сел тасқынының қалыптасу және жүріп өту зонасына айналады [135]. Сонымен қатар, өзен желісі жиілігінің ең жоғары мәндері жауын-шашын мол түсетін биік таулы аудандарға тән. Сондықтан сел тасқыны қауіптілік деңгейін анықтауда өзен желісінің жиілігі маңызды фактор болып табылады.

9. Өсімдік жамылғысының қалыптандырылған индексі (Normalized difference vegetation index) – зерттеу ауданындағы өсімдіктердің саны мен сапасының сандық көрсеткіші. Өсімдік жамылғысының эрозияға қарсы әрекеті қалың қабатты шымдардың орын алуынан байқалады. Шымдар мен ағаш тамырлары беткейлік беттік ағындының эрозиялану әрекетін бәсеңдетіп, деллювиалды және коллювиалды шөгінділердің бекуіне жағдай жасайды [143]. Ал ол өз кезегінде, аумақтың эрозияға ұшырау қабілетін айтарлықтай төмендетіп, сел тасқыны қуаттылығының төмендеуіне әсерін тигізеді. NDVI мәндері «-1» мен «0» аралығында болса, онда зерттеу ауданында инфрақұрылым объектілері мен қар, су, топырақ жамылғысы мен тау жыныстарының таралғандығын көрсетсе, «0» мен «1» аралығы өсімдік жамылғысына тиесілі [144]. Осыған орай, зерттеліп отырған ауданның өсімдік жамылғысы кеңістіктік кескіндеу мүмкіндігі 10 м-ге ие Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдерінің негізінде келесі формула арқылы анықталды (7).

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (7)$$

мұндағы NIR – жақын инфрақызыл аймақтағы көрініс, RED – қызыл аймақтағы көрініс.

10. Имараттан қашықтығы. Сел тасқындарының алдын алу, оның зиянды салдарын төмендету немесе жою мақсатында зерттеу аумағындағы Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында сел тасқынынан қорғайтын имараттар салынған. Бұл имараттар аумақтың сел тасқынына ұшырау дәрежесін төмендетуге ықпал етеді. Имараттардың орналасу координаттары мұрағаттық және ведомстволық есептерден алынды.

Әрбір критерийді бағалау нәтижесінде келесідей нәтижелерге қол жеткізілді:

1. Сел қауіпті объектілерден қашықтығы (Distance from hazard objects). Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарында орналасқан мұздықтық-мореналық көлдер мен сел ошақтары сел қауіпті объектілер ретінде таңдалып алынды. Талдау нәтижесі бойынша сел қауіпті объектілерден қашықтық 0-6,7 км аралығында қауіптіліктің 5 дәрежесіне бөлінді. Сел қауіпті объектілерден 0-0,8 км аралығындағы қашықтық қауіптілігі өте жоғары, 0,8-1,6 км аралығы қауіптілігі жоғары, 1,6-2,6 км аралығы қауіптілігі орташа, 2,6-4,1 км аралығы қауіптілігі төмен, 4,1-6,7 км аралығы қауіптілігі аса төмен категорияларына жіктелді. Әрбір категория бойынша қауіптілік мәндері мен олардың негізіндегі қауіпті аудандардың үлесі 3-кестеде келтірілген.

2. Жауын-шашын (Precipitation). Жауын-шашын қауіптілік дәрежесі бойынша 76-109 мм аралығы – өте жоғары, 109-135 мм аралығы – жоғары, 135-162 мм аралығы – орташа, 162-190 мм аралығы – төмен, 190-230 мм аралығы – аса төмен болып бөлінді.

3. Топырақ (Soil). Топырақтың құрамы, генезисі және қуаты сел тасқынына әсер ету дәрежесін анықтау үшін, 2005 ж. әзірленген 1:500 000 масштабтағы Жетісу аумағының топырақ картасы пайдаланылды. Нәтижесінде топырақтың сіңіргіштік және инфильтрациялық өткізгіштік қасиетіне қарай қауіптілігі аса жоғары (5) аймақ ретінде мұздықтар, фиронные поля, жартастар, қорымдар-ден құралған зонасы, жоғары (4) – таулы-орманды қара топырақ тәрізді зонасы, орташа (3) – таулы дала қара топырақтардан құралған зонасы, төмен (2) – шаймаланған таулы қара топырақтардан құралған зонасы, өте төмен (1) – таулы-шалғынды альпілік, субальпілік шымтезектен құралған зонасы ретінде қабылданды.

4. Биіктік (Elevation). Зерттеу ауданындағы сел қауіпті объектілер 1158-4335 м биіктік аралығында таралған. Биіктік белгілері бойынша сел тасқынының аса қауіпті белдеуі ретінде 1700-2900 м., жоғары - 2900-3300 м, орташа - 3300-4335 м, төмен - 1158-1700 м аралықтары анықталды. Қауіптілігі аса жоғары аумақ ретінде 2900-3300 м аралығы анықталды, себебі бұл аумақта сел ошақтарының көп саны мен ауданы тіркелген.

5. Еңістік (Slope). Зерттеліп отырған аумақ үшін сел қауіптілігін бағалауда еңістік маңызды факторлардың бірі болып табылады. Оған қоса нөсерлі жауын-шашын мен тік еңістіктің болуы және бос сынықты материалдардың жинақталуы апатты сел тасқындарының қалыптасуына әкеледі. Зерттеу нәтижелері бойынша қауіптілігі аса жоғары аумақтың еңістігі 40-80° аралығында жалпы ауданы, жоғары 32-40° аралығында, орташа 24-32°, төмен 14-24°, өте төмен 0-14° аралығын құрады.

6. Ағынды қуатының индексі (Stream power index). Зерттеліп отырған аумақтың ағынды қуатының индексі сел қауіптілігіне байланысты 5 дәрежеге бөлінді: өте жоғары (4,5-13,5), жоғары (2-4,5), орташа (0,3-2), төмен (-4,3-0,3) және өте төмен (-13,8—4,3). Ағынды қуатының индексінің жоғары мәндері аумақтағы еңістіктің және өзен ағындысының жоғары мәндерін көрсетеді. Осылайша, SPI қалыптасқан сел тасқынының бос сынықты материалдарды

тасымалдау қабілетін анықтайды. SPI жоғары болған сайын, бос сынықты материалдар да ұлғайып, сел тасқынының тығыздығына әсер етеді.

7. Бос сынықты материалдардың тасымалдану индексі (Sediment transport index). Зерттеу ауданы бойынша бос сынықты материалдардың тасымалдану индексінің мәндері 0-858 аралығын құрады. Бос сынықты материалдардың таралған өте жоғары индекс мәндері 478-858, жоғары 263-478, орташа 111-263, төмен 24-111, өте төмен 0-24 аралығын қамтыды.

8. Өзен желісінің жиілігі (Drainage Density). Зерттеу ауданындағы өзен желісінің жиілігі бойынша қауіптілігі өте жоғары мәндер ретінде 0,7-1,1, жоғары 0,5-0,7, орташа 0,4-0,5, төмен 0,2-0,4, өте төмен 0-0,2 аралығы анықталды. Өзен желісінің жиілігі сел тасқынының ең жоғары шегіне әсер етеді. Өзен желісі жиілігінің мәні жоғары болуы ағынды деңгейінің артуына әкеледі. Осылайша, өзен деңгейінің артуы сел қауіптілігінің де жоғары болуын көрсетеді.

9. Өсімдік жамылғысының қалыптандырылған индексі (Normalized difference vegetation index). Өсімдік жамылғысының қалыптандырылған индексін бағалау барысында зерттеу ауданының аса жоғары ауданы ретінде – су объектілері, қауіптілігі жоғары ауданы ретінде – тақыр жерлер, орташа – ауылшаруашылық жерлер, төмен – ағаштар, өте төмен – шөп тектес өсімдік жамылғылары анықталды.

10. Имараттан қашықтығы (Distance from hydrotechnic structures). Зерттеу ауданында орналасқан сел тасқынынан қорғайтын имараттан қашықтық 0-16 км аралығын қамтыды. Соның ішінде, ең жақын 0-3,1 км аралығындағы қашықтық қауіптіліктің өте төмен екендігін көрсетсе, ең алыс 12,4-16 км аралығындағы қашықтық қауіптіліктің аса жоғары дәрежесін көрсетті.

5.1.2 Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау критерийлері

Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау үшін басты критерийлер ретінде сел қауіптілігін анықтауда қолданылған сел қауіпті объектілер (мұздықтық-мореналық көлдер (1) мен сел ошақтары (2)), биіктік (5) және еңістік (6) көрсеткіштері мен өсімдік жамылғысымен (10) қатар, зерттеу ауданындағы шаруашылық объектілер, тұрғын үйлер, халық санының тығыздығы, топографиялық ылғалдылық индексі, олардың өзеннен, жол тораптарынан және селден қорғану имараттарынан қашықтығы алынды.

1. Жерді пайдалану және жер беті жамылғысы (LULC) – ағынды сулардың пайда болуы, инфильтрация және булану сияқты гидрологиялық процестердің кейбір компоненттеріне тікелей немесе жанама әсер етеді [141]. Сол себепті, LULC арқылы зерттеу ауданындағы су объектілері, ауылшаруашылық, вегетациялық және тақыр жерлер, шаруашылық орындарының орналасу аумақтары анықталды. Соның ішінде, ауданның жерді пайдалану сұлбасы тұрғылықты халықтың жерді пайдалану түрі мен

аудандағы табиғи процестер айқындалды. LULC мәндері кеңістіктік кескіндеу мүмкіндігі 10 м болатын Sentinel-2 ғарыштық түсірілімі арқылы анықталды.

2. Өзендерден қашықтығы. Шаруашылық объектілерін апатты сел тасқындарының салдарынан қорғау үшін ең алдымен сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау қажет. Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарға олардың өзендерден қашықтығы қатты әсер етеді, сел тасқындары сызықтық құбылыс болғандықтан, су объектілерінен алыстаған сайын, сел тасқынына ұшырау дәрежесі азайып, оларға жақын жерлердің қауіптілік дәрежесі жоғарылай түседі [145]. Зерттеу аумағындағы өзендер желісі «HydroSHEDS» базасының «HydroRIVERS» топтамасынан алынды.

3. Жолдардан қашықтығы. Сел тасқындары өзінің жүру жолында негізінен автомобиль және темір жолдарға, көпірлерге, суару жүйелеріне, электр желілеріне, ғимараттар мен құрылыстарға зиян келтіретіндігі белгілі [78]. Сондықтан да, жолдардан қашықтықты есептеу сел қаупін басқару кезінде жүзеге асырылатын маңызды қадамдардың бірі. Жол желісі – сел тасқыны кезінде зардап шеккен елді мекендер үшін төтенше жағдайларды жою үшін, яғни халықты эвакуациялау кезінде оның маңыздылығы артады, сол себептенде сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау кезінде жолдардың қауіптен алыс-жақындығын алдын-ала айқындап алған жөн. Зерттеу аумағына қатысты жол желісі мәліметтері «OpenStreetMap» ашық қолданыстағы жобадан алынды.

4. Халықтың тығыздығы – 1 км² аумақта тұратын халық саны. Зерттеу аумағы толықтай дерлік Алматы қаласы аумағын қамтығандықтан, Қазақстан бойынша халық тығыздығы жоғары аумаққа жатады. Сел тасқынының әсер ету зонасындағы халық санының тығыздығы сел тасқынына ұшырау деңгейіне тікелей әсер етеді, яғни халық саны тығыз орналасқан аумақтар, аумақтың сел тасқынына ұшырау мүмкіндігін арттыра түседі. Үлкен және Кіші өзен алаптары бойынша халық саны тығыздығының мәндері Алматы қаласының цифровизация басқармасынан алынды.

5. Ылғалдылықтың топографиялық индексі (TWI) – қандай да бір аумақтың тұрақты жағдайындағы ылғалдылықтың индексі болып табылады. Бұл аумақтағы су жинақталу тенденциясын сипаттайтын, гидрологиялық процестерді сандық бағалау кезінде қолданылатын кеңінен таралған индекс [146]. Ылғалдылықтың топографиялық индексі гидрологиялық процестерге кеңістіктік масштаб эффектісін зерттеу үшін қолданылады [137]. Ол су жинау алабының әлеуетті ылғалдылығын көрсетіп, төмендегі формула арқылы анықталады (18):

$$TWI = \ln(A_s / \tan(\beta)) \quad (8)$$

мұндағы A_s – ағынды қалыптасуына үлес қосатын нақты аудан, β – градиент немесе еңістік.

Бұл индекстің үлкен мәндері ылғалдың жинақталуына, оның топырақ құрамындағы мол мөлшеріне сәйкес келеді.

Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалауда пайдаланылған әрбір критерийді талдау нәтижесінде келесідей нәтижелерге қол жеткізілді:

1. Жерді пайдалану және жер беті жамылғысы (Land use and land cover). Жерді пайдалану және жер беті жамылғысының зерттеу нәтижелері бойынша Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарының сел тасқынына ұшырайтын қауіптілігі аса жоғары аумағы ретінде шаруашылық орындары, жоғары – су объектілері, орташа – тақыр жерлер, төмен – ауылшаруашылық жерлері, өте төмен аумақ ретінде өсімдік жамылғылары белгіленді.

2. Өзендерден қашықтығы (Distance from river). Зерттеу ауданындағы сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалауда аса маңызды. Өзеннен қашықтық алыстаған сайын, сел тасқынына ұшырақтын аумақтың қауіптілігі де төмендейтінін көрсетеді. Алайда, Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарының жағасына жақын маңда көптеген елді-мекендер, ғимараттар орналасқан. Қауіптілік деңгейі бойынша 5 категорияға – 0-0,9 км аралығы, 4 категорияға – 0,9-1,8 км, 3 – 1,8-2,7 км, 2,7-3,5 км, 3,5-4,4 км аралықтары жатқызылды. Осылайша, өзеннен қашықтықты бағалау барысында қауіптілігі аса жоғары аумақ 45,1% құраса, ең төмен аумақ 1,4% құрады.

3. Жолдардан қашықтығы (Distance from road). Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалау барысында тұрғындарды эвакуациялау, құтқару жұмыстарын жүргізу үшін жолдардан қашықтықты ескерген жөн. Зерттеу нәтижелері бойынша қауіптілігі аса жоғары аймақ ретінде 0-1,1 км, жоғары – 1,1-2,3 км, орташа - 2,3-3,4 км, төмен - 3,4-4,6 км, аса төмен - сел тасқынына ұшырайтын аса жоғары аумақ 43,8%, ең төмен аумақ 1,5% құрады.

4. Халықтың тығыздығы (Population density). Зерттеу нәтижелері бойынша Үлкен Алматы өзен алабындағы халық тығыздығы 2473 адам/км², Кіші Алматы өзен алабында халық тығыздығы 1276 адам/км² құрады. Соның ішінде Үлкен Алматы өзен алабының төменгі бөлігінде халық тығыздығының 67% орналасқан. Сол себепті, Үлкен Алматы өзен алабының төменгі бөлігі және Кіші Алматы өзен алабын қауіптілігі өте жоғары дәрежесі берілсе, Үлкен Алматы өзен алабының жоғарғы бөлігіне қауіптілігі жоғары дәрежесі берілді.

5. Ылғалдылықтың топографиялық индексі (Topographic wetness index). Зерттеу ауданындағы ылғалдылықтың топографиялық индексі 1,1 – 23,8 аралығын құрады. Сәйкесінше, сел тасқынына ұшырайтын аумақтардың аса жоғары қауіптілігі – 1,1-4,4 аралығын, жоғары – 4,4-5,9, орташа – 5,9-7,9, төмен 7,9-11,4, өте төмен – 11,4-23,8 аралығын құрады.

5.1.3 Іле Алатауының орталық бөлігіндегі сел қауіптілігін тудыратын және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтаудағы критерийлерді бағалау әдісі

Жоғарыда көрсетілген мәліметтердің барлығы ArcGIS 10.8 бағдарламасында өңделді. Сонымен қатар, өңдеу нәтижесінде қол жеткізілген нәтижелер арнайы әдістерді пайдалану арқылы бағаланып, нәтижесінде

зерттеу ауданы үшін сел тасқынының қауіптілік және сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы жасалды.

Зерттеліп отырған аудандағы сел тасқынына ұшырайтын аумақтар және сел тасқыны қауіптілігін анықтау барысында, әрбір критерийдің әсер ету үлес салмағын анықтау үшін шешім қабылдаудың математикалық моделі - аналитикалық иерархиялық процесс (Analytical hierarchy process (АНР)) қолданылды [147]. Оны басқаша шешім қабылдауды жеңілдетуге бағытталған компоненттер иерархиясын қамтитын мультикритериялық шешім қабылдау процесі деп те атайды [116]. АНР моделінің жұмыс істеу принципі келесідей: біріншіден, сел тасқынының қауіптілігіне және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарға әсер етуші критерийлерінің иерархиясы анықталады. Содан соң иерархиядағы элементтердің әрбір жұбы үшін бір элементтің екіншісіне қатысты маңыздылығы оларды таңдау шкаласының негізінде жұптық салыстыру арқылы анықталады [148].

АНР моделі көптеген айнымалылар немесе критерийлердің басымдылығын анықтау және таңдау кезіндегі күрделі орталарда шешім қабылдаудың тиімді, әрі қолдануға оңай әдістемесі болып табылады [149], [150]. Ол жолдар мен бағандардан құралған жұптық матрица негізінде жүзеге асырылады. Бағандар мен жолдардағы критерийлердің салмағы маңыздылық шкаласындағы [150] 1...9 аралығындағы мәндердің қатынасы арқылы анықталады (5-кесте). Критерийлердің әрқайсысының маңыздылық шкаласы бойынша мәндері таңдалып, сәйкесінше бағанда орналасқан жекелеген критерийлермен басымдылығы салыстырылады. Әрбір критерийдің келесі деңгейгейдегі критерийге қатысты маңыздылығы анықталып, сел қауіптілігіне немесе сел тасқындарына ұшырайтын аумақтарға қатысты критерийлердің әсер ету дәрежесі анықталады [151].

Кесте 5. Қауіптілік дәрежесін анықтауда пайдаланылған маңыздылық шкаласы (Саати Т.Л. бойынша)

Маңыздылық шкаласы	Анықтамасы	Түсініктемесі
1	Маңыздылығы бірдей	Екі элементтің әсер ету деңгейі бірдей
3	Маңыздылығы орташа	Бір элементтің әсер ету деңгейі екіншісінен сәл артық
5	Маңыздылығы жоғары	Бір элементтің әсер ету деңгейі екінші элементтен жоғары
7	Маңыздылығы өте жоғары	Бір элементтің әсер ету деңгейі екінші элементтен өте жоғары
9	Маңыздылығы экстремалды	Бір элементтің әсер ету деңгейі екінші элементтен экстремалды жоғары
2,4,6,8 аралық мәндерді өрнектеуге болады		

Нәтижесінде критерийлердің үлес салмақтарын есептеу үшін қолданылатын жұптық қатынастардың матрицалары құрастырылды. Жұптық қатынастар матрицасын тұрғызу кезінде әрбір критерийдің маңыздылық шкаласы бойынша мәндері таңдалады. Таңдалған мәндердің арақатынасы арқылы шыққан сандардың геометриялық орташа мәні анықталады. Ол үшін (Саати Т.Л., 1993):

1. Әр жолдың элементтерін қосу арқылы және оны барлық элементтердің қосындысына бөлу арқылы қалыптандыру (нормализовать) керек; алынған нәтижелердің қосындысы 1-ге тең болады.

Алынған вектордың бірінші элементі бірінші объектінің басымдығын көрсетеді, , екіншісі - екінші объект және т. б.

2. Әр бағанның элементтерін қосып, алынған нәтижелердің (қосындылардың) кері мәндерін алу керек. Әрбір элемент қосындысы 1-ге тең болатындай етіп, қалыптандыру керек, ол үшін кері шаманың әрқайсысын барлық кері шамалардың қосындысына бөлігі болады.

3. Әр бағанның элементтерін сол бағанның элементтерінің қосындысына бөлу керек (яғни бағанды қалыптандыру керек), содан кейін алынған әрбір жолдың элементтерін қосып, қосындыны жол элементтерінің санына бөлу керек. Бұл қалыптандырылған бағандар бойынша орташалау процесі.

4. Әр жолдың n элементтерін көбейтіп, n -ші дәрежелі түбір астынан шығару керек. Алынған сандарды қалыптандыру керек. Бұл процесті келесі формуланың көмегімен өрнектеуге болады (1):

$$GM_{\bar{y}} = \sqrt[n]{y_1 y_2 y_3 \dots y_n} \quad (9)$$

Сел қауіптілігі мен сел тасқындарына ұшырайтын аумақтарға қатысты әрбір критерийлер бойынша ГАЖ ортасында жекелеген қабаттар жасалып, қауіптілік пен сел тасқынына ұшырау мүмкіндігінің 1-5-ке дейінгі дәрежелері мен олардың әрбір критерийге қатысты анықталған үлес салмағы негізінде қабаттарды қабаттастыру (overlay) арқылы сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аумақтар дәрежесі бағаланды [151].

Нәтижесінде критерийлердің үлес салмақтарын есептеу үшін қолданылатын жұптық қатынастардың матрицалары құрастырылды (6-7-кесте).

Кесте 6. Сел қауіптілік дәрежесін анықтаудағы критерийлер бойынша тұрғызылған жұптық қатынастар матрицалары

Критерийлер	СҚО қашықтығы	Биіктік	Еңістік	Жауын-шашын	Өзен желісінің жиілігі	SPI	STI	Топырақ	NDVI	СҚИ қашықтығы
Маңыздылық шкаласы	1	1	2	3	5	4	7	6	4	6

СҚО қашықтығы	1	1.00	1.00	2.00	3.00	5.00	4.00	7.00	6.00	4.00	6.00
Биіктік	1	1.00	1.00	2.00	3.00	5.00	4.00	7.00	6.00	4.00	6.00
Еңістік	2	0.50	0.50	1.00	1.50	2.50	2.00	3.50	3.00	2.00	3.00
Жауын-шашын	3	0.33	0.33	0.67	1.00	1.67	1.33	2.33	2.00	1.33	2.00
Өзен желісінің жиілігі	5	0.20	0.20	0.40	0.60	1.00	0.80	1.40	1.20	0.80	1.20
SPI	4	0.25	0.25	0.50	0.75	1.25	1.00	1.75	1.50	1.00	1.50
STI	7	0.14	0.14	0.29	0.43	0.71	0.57	1.00	0.86	0.57	0.86
Топырақ	6	0.17	0.17	0.33	0.50	0.83	0.67	1.17	1.00	0.67	1.00
NDVI	4	0.25	0.25	0.50	0.75	1.25	1.00	1.75	1.50	1.00	1.50
СҚИ қашықтығы	6	0.17	0.17	0.33	0.50	0.83	0.67	1.17	1.00	0.67	1.00

Кесте 7. Сел тасқынына ұшырау дәрежесін анықтаудағы критерийлер бойынша тұрғызылған жұптық қатынастар матрицалары

Критерийлер		Өзендерден қашықтығы	LULC	Халықтығы	СҚО қашықтығы	Еңістік	Жолдардан қашықтығы	Биіктік	TWI	NDVI	СҚИ қашықтығы
	Маңыздылық шкаласы	4	2	2	1	4	1	1	5	3	6
Өзендерден қашықтығы	4	1.00	0.50	0.50	0.25	1.00	0.25	0.25	1.25	0.75	1.50
LULC	2	2.00	1.00	1.00	0.50	2.00	0.50	0.50	2.50	1.50	3.00
Халықтығы	2	2.00	1.00	1.00	0.50	2.00	0.50	0.50	2.50	1.50	3.00
СҚО қашықтығы	1	4.00	2.00	2.00	1.00	4.00	1.00	1.00	5.00	3.00	6.00
Еңістік	4	1.00	0.50	0.50	0.25	1.00	0.25	0.25	1.25	0.75	1.50
Жолдардан қашықтығы	1	4.00	2.00	2.00	1.00	4.00	1.00	1.00	5.00	3.00	6.00
Биіктік	1	4.00	2.00	2.00	1.00	4.00	1.00	1.00	5.00	3.00	6.00
TWI	5	0.80	0.40	0.40	0.20	0.80	0.20	0.20	1.00	0.60	1.20
NDVI	3	1.33	0.67	0.67	0.33	1.33	0.33	0.33	1.67	1.00	2.00
СҚИ қашықтығы	6	0.67	0.33	0.33	0.17	0.67	0.17	0.17	0.83	0.50	1.00

Сел қауіптілігі мен сел тасқындарына ұшырайтын аумақтарға қатысты әрбір критерийлер бойынша ГАЗ ортасында жекелеген қабаттар жасалып, қауіптілік пен сел тасқынына ұшырау мүмкіндігінің 1-5-ке дейінгі дәрежелері мен олардың әрбір критерийге қатысты анықталған үлес салмағы негізінде

қабаттарды қабаттастыру (overlay) арқылы сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аумақтар дәрежесі бағаланды.

Сел қауіптілігі (hazard) дегеніміз зиян келтіруі мүмкін құбылыстардың, оқиғалардың, процестердің көрініс беру мүмкіндігі [1], [2], [4], [103]. Қауіптілік қауіп арқылы айқындалады. Қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін қауіпті талдау және бағалау қажет.

Гладкевич, Терский, Фролова [152] зерттеулеріне сүйене отырып, сел қауіптілігін қалыптасу және жүріп өту уақыты мен орны айқын әлеуетті қиратушы күшке ие сел құбылысының көрініс беру ықтималдығы деп түсіндіруге болады. Сел қауіптілігі аумақтағы сел қалыптастырушы факторлардың кешені арқылы анықталады, ол өз кезегінде, сел тасқынының дамуы мен қарқындылығына әсер етеді.

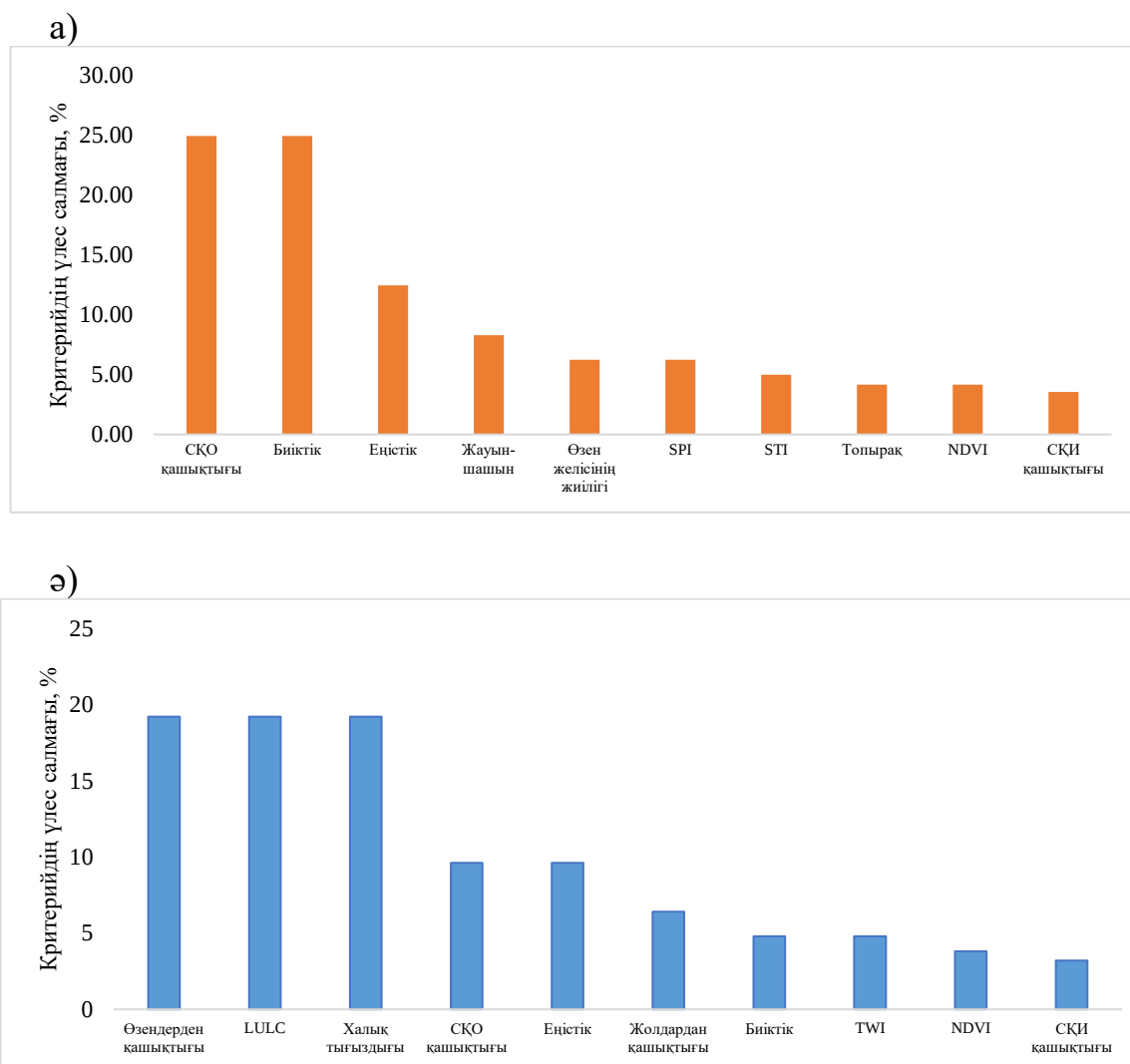
Сел тасқынына ұшырау мүмкіндігі (vulnerability) әлеуетті сел тасқынының жүріп өтуі нәтижесінде туындайтын шығын дәрежесі [152]. Шығын түрлері, әдетте, адам өлімімен және шаруашылық орындардың, соның ішінде, ғимараттар, құрылыстар, инфрақұрылым, мәдени құндылықтар, мүліктер, экономикалық қызметтердің бұзылуымен байланысты. Сел тасқынына ұшырау мүмкіндігі сел қауіптілігіне әлеуметтік, физикалық, экономикалық құрылымдардың қарсы тұра алу қабілетінің функциясы болып табылады.

Сондай-ақ, ұшырау мүмкіндігі [153] зерттеулеріне сәйкес, аумақтың немесе белгілі бір учаскенің жағымсыз әсерлерге бейімділігі ретінде қарастырылған. Ұшырау мүмкіндігі динамикалық сипаттама, ол түрлі масштабта уақыт және кеңістік бойынша өзгеріп отырады, сонымен қатар экономикалық, географиялық, демографиялық, мәдени, институционалды, басқарушылық және экологиялық факторларға тәуелді болады. Ұшырау мүмкіндігі қауіпті құбылыстарға қатысты шығын түсінігімен тікелей байланысты, дегенмен, әлі күнге дейін толыққанды зерттеулер арқылы бағаланбаған. Сондай-ақ, қазақстандық зерттеулерде [52], [93], [154] сел тасқындарына қатысты қауіптілік және қауіп ұғымдары кеңінен қолданылып, сел тасқындарына ұшырауы мүмкін аумақтарды анықтау назардан сырт қалған.

Ұшырау мүмкіндігі – кез келген материалдық объектінің белгілі бір генезистегі, қарқындылықтағы апатты құбылыстың жүріп өту нәтижесінде табиғи немесе белгіленген функцияларын орындау қабілетін ішінара немесе толық жоғалту қасиеті ретінде анықталады [155]. Объектілердің апатқа ұшырау мүмкіндігін зерттеу нақты объектілерден, яғни «төменнен» жүзеге асырылады. Ұшырау көрсеткіштері жоғары дәрежелі объект шегіндегі бастапқы объект-элементтердің құрылымдық қатынастарын ескере отырып, келесі дәреженің жинақталған көрсеткіштеріне біріктіріледі. Ұшырау мүмкіндігін бағалау мақсатында объектілерді типтеу зиянды әсер етудің түрі мен механизмімен анықталады және жұмыстың детальдылық деңгейін ескере отырып, апатты табиғи және техно-табиғи процестердің әрқайсысына қатысты жүзеге асырылады.

Қазіргі уақытта сел тасқынына ұшырайтын аумақтағы шаруашылық объектілерді анықтау қиынға соғады. Бұл қауіпті табиғи құбылыстардың келтірген шығын мөлшері туралы статистикалық мәліметтердің жеткіліксіз болуымен, сондай-ақ оларды бағалаудың әртүрлі деңгейлерінде сел тасқындарының әсер ету зонасындағы реципиенттердің сел тасқындарына төтеп беру мүмкіндігін көрсететін модельдердің жеткіліксіз әзірленуімен байланысты [151]. Алайда, бұл зерттеуде Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы сел тасқынына ұшырауы мүмкін объектілердің мәліметтері жинақталып, зерттеу ауданы үшін алғашқы рет сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы жасалды.

Сел тасқынының қауіптілігі және сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау мақсатында таңдалған критерийлердің үлес салмағы ArcGIS 10.8 бағдарламасындағы АНР функциясы негізінде есептелді (28а, ә-сурет).



Сурет 28. Сел тасқынының қауіптілігін анықтауда бағаланған критерийлердің маңыздылық дәрежесі

а) сел қауіптілігін анықтаудағы критерийлер

ә) сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтаудағы критерийлер

Сел тасқындары «су – бос сынықты материал – еңістік» жүйесінің тепе-теңдігі бұзылуы нәтижесінде туындайтындықтан, сел тасқынының қауіптілік критерийлерін таңдау кезінде: сел тасқынының «су» құраушысын анықтаушы критерийлер ретінде мұздықтық-мореналық көлдерден қашықтығы, жауын-шашын мөлшері, өзен желісінің жиілігі, ағынды қуатының индексі сияқты критерийлер алынды. Сел тасқынының қатты құраушысын құрайтын «бос сынықты материалдар» топырақ жамылғысы, сел ошақтарынан қашықтығы, бос сынықты материалдардың тасымалдану индексі арқылы айқындалды. Сел тасқынының қалыптасуына ықпал ететін «еңістікті» анықтаушы критерийлер ретінде биіктік және еңістік мәндері алынды. Өсімдік жамылғысының қалыптандырылған индексі мен имараттан қашықтығы индексі сел тасқынының қауіптілік дәрежесіне теріс әсер ететін критерийлер ретінде пайдаланылды.

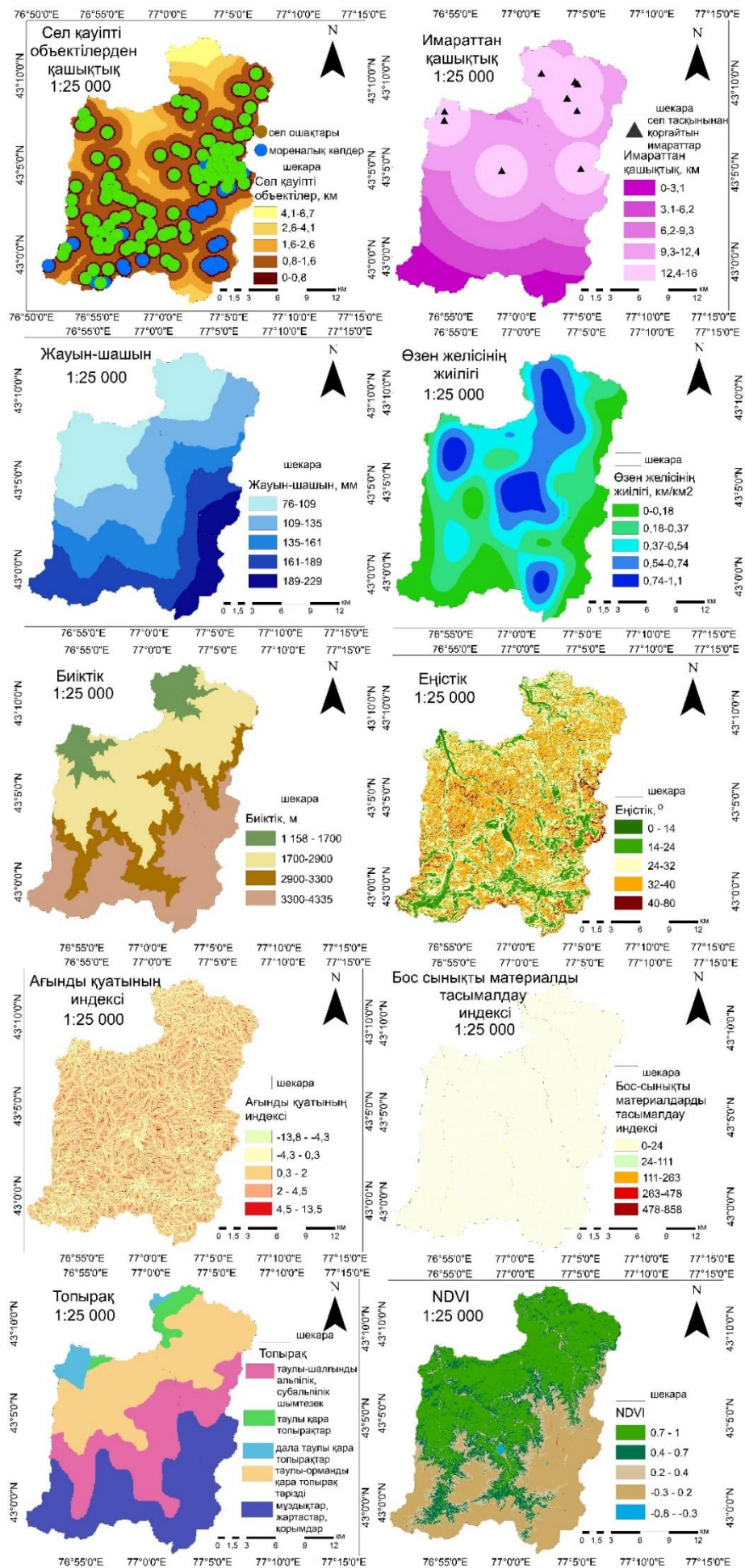
Кіші Алматы мен Үлкен Алматы өзен алаптарындағы сел тасқынының қауіптілігін анықтау барысында қолданылған критерийлердің маңыздылық дәрежелері 8-кестеде көрсетіліп, олардың негізінде 1:25000 масштабтағы карта тұрғызылды (29-сурет).

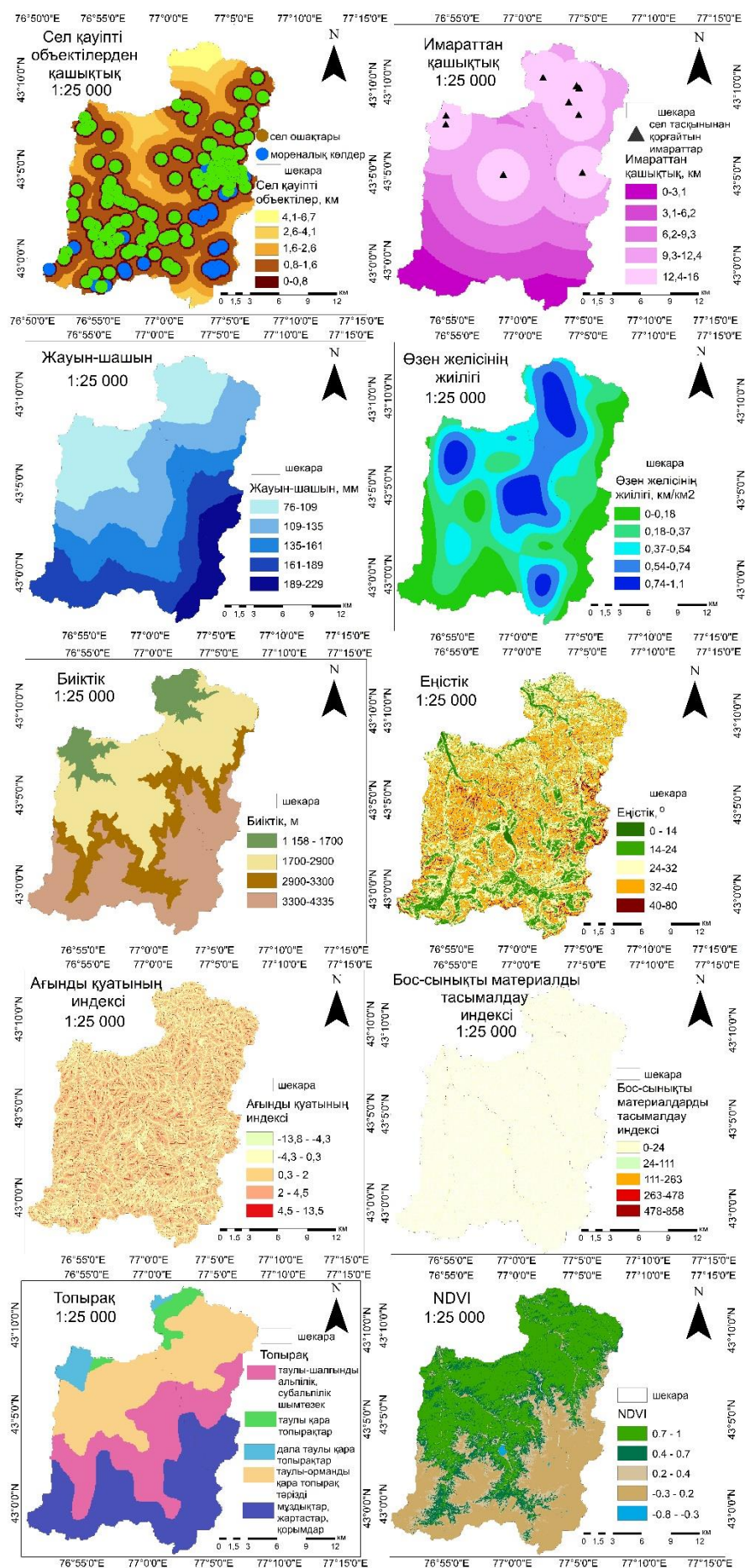
Кесте 8. Сел қауіптілігі критерийлерінің маңыздылық дәрежесі

Сел қауіптілігінің критерийлері	Критерийлердің өлшем бірліктері	Критерийлердің қауіптілік дәрежесі			Қауіпті учаске ауданы	
		мәндері	сипаттамасы	категориясы	км ²	%
Сел қауіпті объектілерден қашықтығы	км	0-0,8	өте жоғары	5	174,1	43,8
		0,8-1,6	жоғары	4	119,5	30
		1,6-2,6	орташа	3	65,5	16,5
		2,6-4,1	төмен	2	27,1	6,8
		4,1-6,7	аса төмен	1	11,6	2,9
Жауын-шашын мөлшері	мм	76-109	аса төмен	1	99	24,9
		109-135	төмен	2	108,1	27,2
		135-161	орташа	3	79,8	20,1
		161-189	жоғары	4	76,3	19,2
		189-229	өте жоғары	5	34,5	8,7
Топырақ жамылғысы	деңгей	таулы-шалғынды альпілік, субальпілік шымтезек	аса төмен	1	104,3	26,2
		шаймаланған таулы қара топырақтар	төмен	2	14,4	3,6

		дала таулы қара топырақтар	орташа	3	12,5	3,1
		таулы- орманды қара топырақ тәрізді	жоғары	4	135,4	34
		мұздықтар, жартастар, қорымдар	өте жоғары	5	131,2	33
Биіктік	м	1158-1700	төмен	2	38,8	9,8
		1700-2900	орташа	3	135,2	34
		2900-3300	өте жоғары	5	72,9	18,3
		3300-4335	жоғары	4	150,8	37,9
Еңістік	°	0-14	аса төмен	1	8,8	2,2
		14-24	төмен	2	60	15,1
		24-32	орташа	3	162,4	40,8
		32-40	жоғары	4	152,3	38,3
		40-80	өте жоғары	5	14,4	3,6
Ағынды қуатының индексі		-13,8- -4,3	аса төмен	1	395	99,3
		-4,3-0,3	төмен	2	2	0,5
		0,3-2	орташа	3	0,5	0,1
		2-4,5	жоғары	4	0,3	0,1
		4,5-13,5	өте жоғары	5	0,1	0
Бос сынықты материалдард ың тасымалдану индексі		0-24	аса төмен	1	395	99,3
		24-111	төмен	2	2	0,5
		111-263	орташа	3	0,5	0,1
		263-478	жоғары	4	0,3	0,1
		478-858	өте жоғары	5	0,1	0
Өзен желісінің жиілігі	км/км ²	0-0,18	аса төмен	1	91	22,9
		0,18-0,37	төмен	2	105,2	26,5
		0,37-0,54	орташа	3	93,5	23,5
		0,54-0,74	жоғары	4	68,4	17,2
		0,74-1,1	өте жоғары	5	39,7	10
NDVI	деңгей	-0,8- -0,3	өте жоғары	5	0,8	0,2
		-0,3-0,2	жоғары	4	125,1	31,5
		0,2-0,4	орташа	3	43,9	11
		0,4-0,7	төмен	2	63,9	16,1
		0,7-1	аса төмен	1	164,1	41,3

Имараттан қашықтығы	км	0-3,1	өте жоғары	5	35,3	8,9
		3,1-6,2	жоғары	4	56,5	14,2
		6,2-9,3	орташа	3	59,9	15,1
		9,3-12,4	төмен	2	128	32,2
		12,4-16	аса төмен	1	118,1	29,7





Сурет 29. Сел қауіптілігі критерийлері

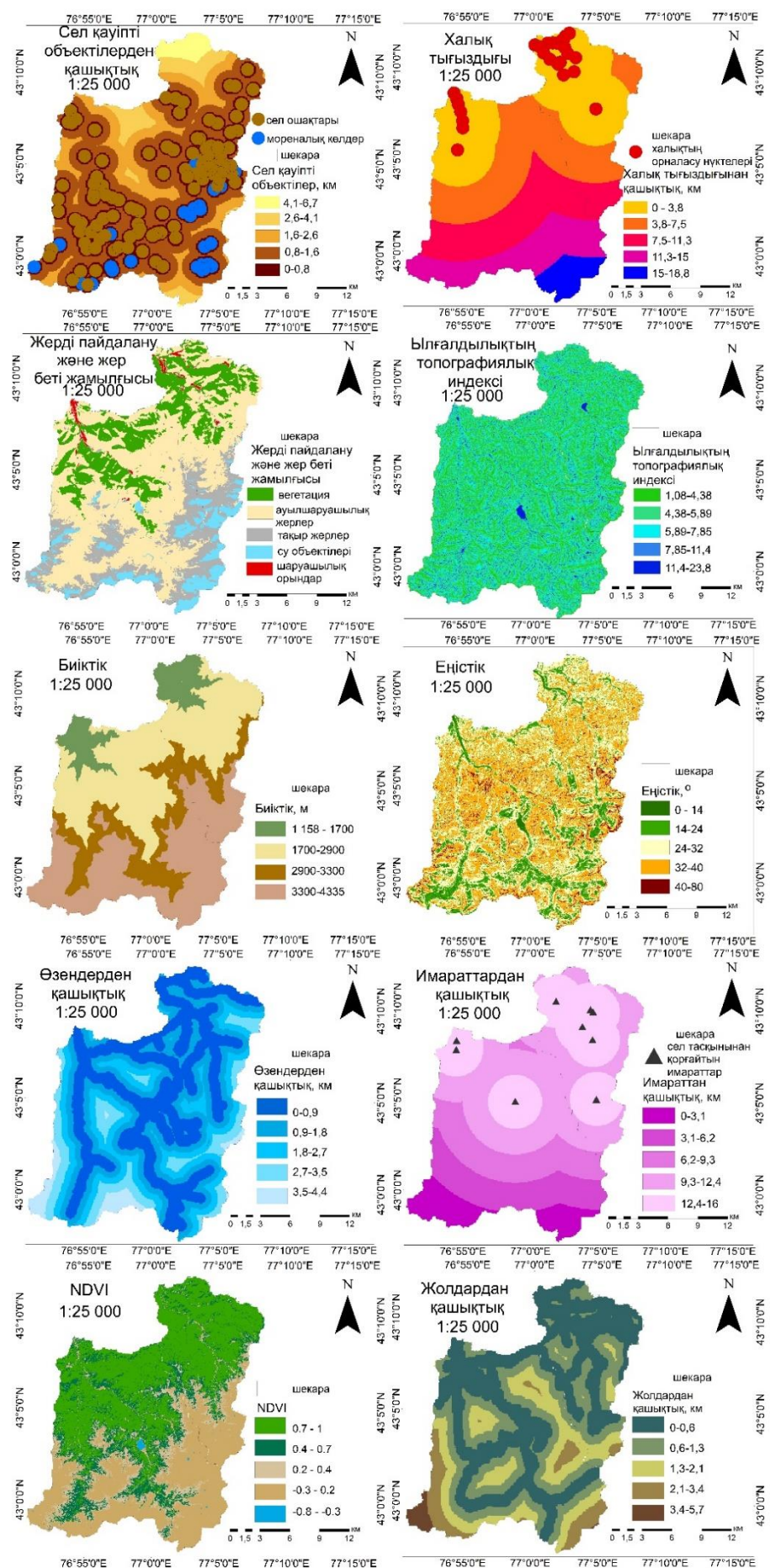
Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау олардың көрініс беру ауданы мен әсер ету зонасындағы реципиенттерге негізделді. Көрініс беру ауданы сел алаптары шегінде анықталды. Классикалық сел алабы сел тасқындары қалыптасу (басталу), тасымалдау (транзит), шөгу (аккумуляция) зоналарын қамтиды [45]. Сел қауіпті объектілерден қашықтығы, биіктік, еңістік сияқты критерийлер сел алабының қалыптасу (басталу) зонасын сипаттаса, TWI, өзендерден қашықтығы, NDVI критерийлері тасымалдау (транзит) зонасындағы сел қауіпіне ұшырау дәрежесін айқындаса, имараттардан қашықтығы шөгу (аккумуляция) зонасының сипатын көрсетеді. Ал әсер ету зонасындағы реципиенттер ретінде халық тығыздығы, жолдан қашықтығы және LULC сияқты критерийлер таңдалды.

Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау критерийлерінің маңыздылық дәрежелері 7-кестеде келтірілген. Сел тасқынына ұшырайтын аумақтар критерийлерінің үлес салмағын анықтау барысында 1:25000 масштабтағы сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы тұрғызылды (30-сурет).

Кесте 9. Сел тасқынына ұшырайтын аумақтар критерийлерінің маңыздылық дәрежесі

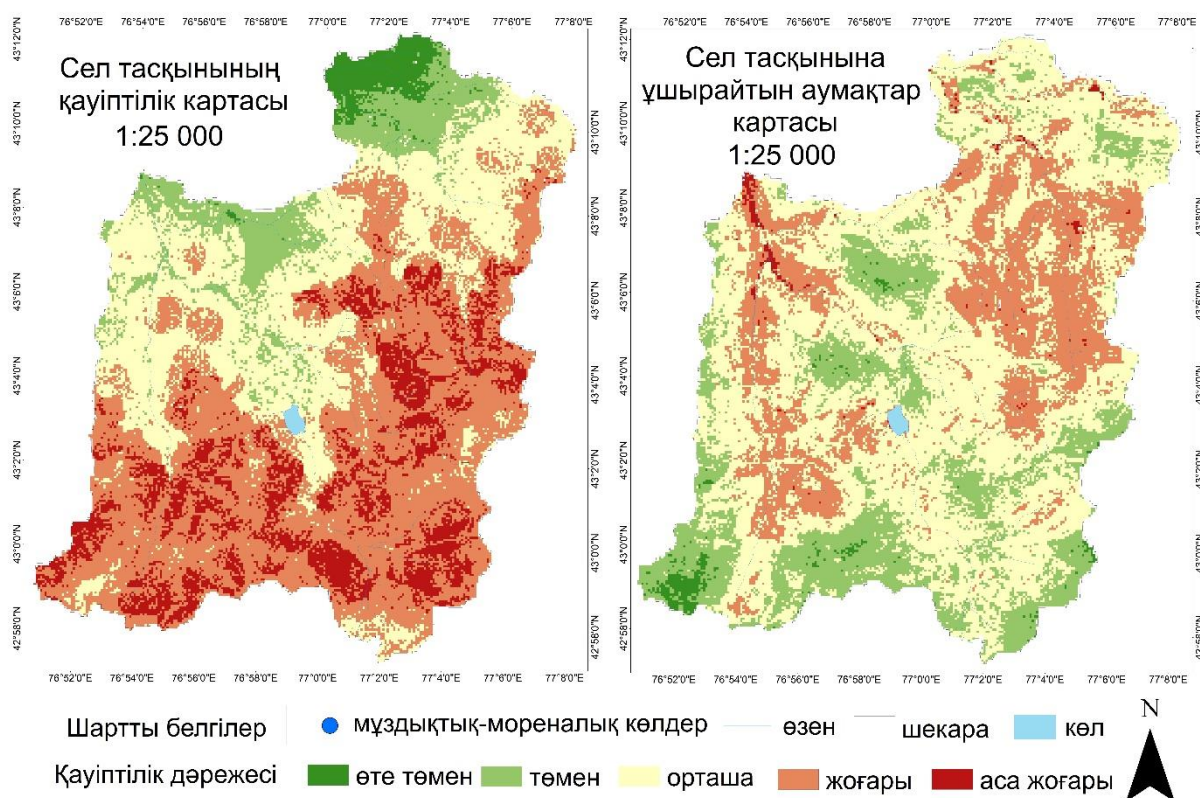
Сел тасқынына ұшырайтын критерийлері	Критерийлердің өлшем бірліктері	Критерийлердің қауіптілік дәрежесі			Сел тасқынына ұшыраған учаске ауданы	
		мәндері	сипаттамасы	категориясы	км ²	%
Сел қауіпті объектілерден қашықтығы	км	0-0,8	өте жоғары	5	174,1	43,8
		0,8-1,6	жоғары	4	119,5	30
		1,6-2,6	орташа	3	65,5	16,5
		2,6-4,1	төмен	2	27,1	6,8
		4,1-6,7	аса төмен	1	11,6	2,9
Халық тығыздығы	адам/км ²	0-3,8	өте жоғары	5	114,7	28,8
		3,8-7,5	жоғары	4	99,4	25
		7,5-11,3	орташа	3	81	20,4
		11,3-15	төмен	2	73,5	18,5
		15-18,8	аса төмен	1	29,2	7,3
LULC		вегетация	аса төмен	1	79,7	20
		ауылшаруашылық жерлер	төмен	2	205,6	51,7
		тақыр жер	орташа	3	75,9	19,1
		су объектілері	жоғары	4	33,2	8,3

		шаруашылы қ орындар	өте жоғары	5	3,5	0,9
Биіктік	м	1158-1700	төмен	2	38,8	9,8
		1700-2900	орташа	3	135,2	34
		2900-3300	өте жоғары	5	72,9	18,3
		3300-4335	жоғары	4	150,8	37,9
Еңістік	°	0-14	аса төмен	1	8,8	2,2
		14-24	төмен	2	60	15,1
		24-32	орташа	3	162,4	40,8
		32-40	жоғары	4	152,3	38,3
		40-80	өте жоғары	5	14,4	3,6
Имараттан қашықтық	км	0-3,1	өте жоғары	5	35,3	8,9
		3,1-6,2	жоғары	4	56,5	14,2
		6,2-9,3	орташа	3	59,9	15,1
		9,3-12,4	төмен	2	128	32,2
		12,4-16	аса төмен	1	118,1	29,7
Өзеннен қашықтық	км	0-0,9	өте жоғары	5	150,8	37,9
		0,9-1,8	жоғары	4	109,2	27,5
		1,8-2,7	орташа	3	73,7	18,5
		2,7-3,5	төмен	2	48,3	12,1
		3,5-4,4	аса төмен	1	15,7	3,9
Жолдан қашықтық	км	0-0,6	өте жоғары	5	174,1	43,8
		0,6-1,3	жоғары	4	118	29,7
		1,3-2,1	орташа	3	70,7	17,8
		2,1-3,4	төмен	2	28,9	7,3
		3,4-5,7	аса төмен	1	6,1	1,5
NDVI	деңгей	-0,8- -0,3	өте жоғары	5	164,1	41,3
		-0,3-0,2	жоғары	4	63,9	16,1
		0,2-0,4	орташа	3	43,9	11
		0,4-0,7	төмен	2	125,1	31,5
		0,7-1	аса төмен	1	0,8	0,2
TWI		1,08-4,38	аса төмен	1	106	26,6
		4,38-5,89	төмен	2	172,1	43,3
		5,89-7,85	орташа	3	87,3	22
		7,85-11,4	жоғары	4	25	6,3
		11,4-23,8	өте жоғары	5	7,4	1,9



Сурет 30. Сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалау критерийлері

Жоғарыда келтірілген критерийлер АНР әдісі негізінде талданып, қауіптілік дәрежесі бойынша жіктеліп (reclass), ГАЗ ортасындағы «Weighted Overlay» функциясы арқылы қабаттастырылды. Әрбір критерийді маңыздылық дәрежесі бойынша қабаттастыру арқылы зерттеу ауданындағы сел тасқынының қауіптілік картасы және сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы (1:25 000) жасалды (31-сурет). Әзірленген карта бойынша зерттеу аумағы қауіптілік дәрежесі бойынша 5 категорияға (1-аса төмен, 2-төмен, 3-орташа, 4-жоғары, 5-өте жоғары) жіктелді. Жалпы ауданы 397,8 км² құрайтын Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптарындағы қауіптілігі өте жоғары аумақ – 116,2 км², жоғары – 103,2 км², орташа – 90,9 км², төмен – 63,4 км², өте төмен – 24,2 км² тең. Ал, зерттеу ауданының сел тасқынына ұшырау мүмкіндігі бойынша өте жоғары аумақ – 52,9 км², жоғары – 100,5 км², орташа – 116,5 км², төмен – 93,7 км², өте төмен – 34,6 км² құрады.



Сурет 31. Үлкен және Кіші Алматы өзен алабындағы сел тасқынының қауіптілік және сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы

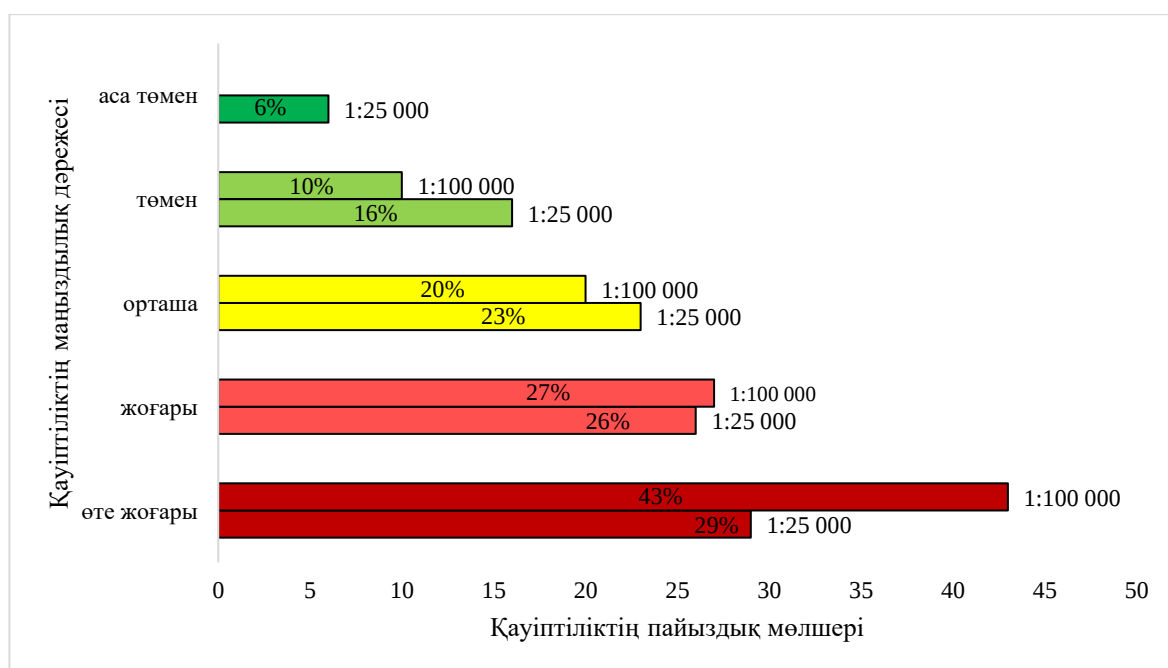
Сел қалыптастырушы факторларды мультикритериялық талдау негізінде сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды бағалау арқылы зерттеу ауданын қауіптілік дәрежесі бойынша зоналанды. Зерттеу нәтижелері аумақтағы сел қауіпін басқару шешімдерін қабылдау кезінде және сел қауіпін ұшырауы мүмкін болатын аумақтарды болжау кезінде қажет болуы мүмкін. Сондай-ақ, қол жеткізілген нәтижелер сел қауіпті аумақта жүзеге асырылуы қажет шаралар мен салынуы мүмкін болатын қорғаныс имараттарын жобалау және жоспарлау кезінде оңтайлы, әрі ұтымды шешімдер

кабылдауға мүмкіндік беретіндігі сөзсіз. Ал, ол өз кезегінде халықты сел тасқындарының апатты әсерінен аман алып қалу мақсатында жүзеге асырылатын қорғану және алдын алу жұмыстарының дұрыс, әрі уақытылы жүзеге асуының негізі болып табылады.

Үлкен және Кіші Алматы өзен алаптары еліміздегі сел құбылыстары белсенді қалыптасатын аумақтарының бірі [38]. Сондай-ақ зерттеу ауданының етегінде еліміздегі қарқынды игерілген, 2 миллион халқы бар [156], шаруашылық, экономикалық және мәдени орындардың ортасы болып табылатын Алматы қаласы орналасқан. Сол себептен де, зерттеліп отырған аудан селдік тұрғыдан жете зерттелген ауданға жатады [87]. Оған дәлел ретінде соңғы жылдары жүзеге асырылған, мемлекет тарапынан қаржыландырылған ғылыми жобалар мен ізденістерді келтіруге болады.

Солардың бірі ретінде география және су қауіпсіздігі институты мамандарының 2011 ж. әзірлеген Үлкен және Кіші Алматы алаптары үшін сел қауіптілігінің 1:100 000 масштабтағы картасының нәтижелері [154], [157], [158] басшылыққа алынды.

Зерттеу барысында қол жеткізілген нәтижелерді жоғарыда аталған Іле Алатауының сел қауіптілігі (1:100 000) картасының фрагментті нәтижелерімен салыстыру төмендегіні көрсетті (32-сурет).



Сурет 32. Іле Алатауының сел қауіптілігі (1:100 000) картасының фрагментті нәтижелерін қол жеткізілген Үлкен және Кіші Алматы өзен алабының сел қауіптілігі (1:25 000) картасымен салыстыру нәтижелері

Салыстыру нәтижесі [154], [157], [158] келтірілген картада қауіптілігі «аса төмен» категорияға аумақтар ретінде ысырынды конус аумағы немесе суайрық сызығы бойынша таудан шыға беріс жерден кейінгі учаскелер жатқызылған. Сондай-ақ қауіптілігі «аса жоғары» категорияға жататын

аумақтардың жалпы үлесі 43% құраса, АНР әдісі бойынша анықталған қауіптілігі «өте жоғары» аумақ 29% құрады. Ал, қауіптілік дәрежесі «төмен», «орташа», «жоғары» категориялар бойынша аумақтар үлес салмағының айырмашылығы мардымсыз.

5.2 Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы кезінде қалыптасатын сел тасқындарын модельдеу және потенциалды қауіптілікті зоналау

Мұздықтық және мәңгі тоңдық қауіптілікті бағалау үшін, ең алдымен, көрініс беретін оқиғалар сценарийлерін қажет [159]. Көрініс беретін оқиғалардың бірнеше сценарийлерін құру сол оқиға күтілетін жиілік пен оның шамасын көрсетеді [159]. Сценарийлер болжамдық сипатқа ие, бірақ климаттың өзгеруі және соның әсерінен криосфераға әсер ету факторларын ескермейді. Сондықтан белгілі бір құрылған сценарий жарамды болатын уақыт аралығы нақты анықталуы керек. Егер сценарий ұзақ уақыт бойы (бірнеше онжылдықтар) жұмыс істейді деп күтілсе, онда болашақтағы климаттық өзгерістерге тиісті назар аудару қажет, бұл өз кезегінде әртүрлі сценарийлермен ұсынылуы мүмкін [160]. Осылайша, қауіпті бағалау жарамды деп саналатын уақыт аралығына байланысты қауіптілік сценарийлері тәуелсіз немесе климаттық сценарийлермен байланысты болуы мүмкін. Қауіпті құбылыстың сценарийлерін әзірлеудің мақсаты шағын, орташа немесе үлкен көрініс беретін оқиғалардан туындайтын потенциалды массаны немесе оның шамасын бағалайтын процеске негізделген қауіптілікті модельдеу үшін үш қауіптілік сценарийін құру болып табылады [161]. Бұл сценарийлер, әдетте, көрініс беретін оқиға пайда болған кездегі массаны немесе шамасын ғана ескереді, ал беткейлердің тасқынның жүріп өту жолында немесе арна бойымен эрозияға ұшырау мүмкіндігі еңістіктің немесе аңғардың төменгі бөлігінде орын алатын жағдайларды модельдеу негізінде бағаланады. Қауіпті көрініс беретін оқиғаның ықтимал сценарийлерін құру үшін келесі шарттарды ескерген жөн [162]:

- Зерттеу алабынан белгілі бір учаскеге дейінгі аумақтардың қауіптілікке ұшырау мүмкіндігін/тұрақтылығын бағалау кезінде жиналған мәліметтер;
- Ретроспекциялық зерттеу нәтижелері және бұрын жүріп өткен құбылыстар бойынша алынған далалық мәліметтер;
- Ашық, қолжетімді мәлімет көздері мен сәйкес процестерді түсінуге негізделген мәліметтер.

Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу сценарийлерін құру олардың қалыптасу механизмдерінің, көл типтерінің және байлам құрамының әртүрлілігіне байланысты күрделі. Мұздықтық-мореналық көлдер үшін ақтарылу сценарийлері көл байламының бұзылуын және көлдің барлық массасының ағып кетуін қамтиды [163]. Бұл құбылыстың ықтималдығы негізінен көл қазаншұңқырының морфометриялық сипаттамаларына

байланысты болады, сондықтан тік және еңсіз орналасқан көл қазаншұңқырлары ауқымды эрозияға ұшырау мүмкіндігіне ие болады.

Зерттеу аумағы үшін қауіпті көрініс беретін оқиға сценарийлерін құру мақсатында Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзен алаптарында жүріп өткен сел тасқындарының сипаттамаларын ескере отырып, RAMMS бағдарламасы арқылы модельдеу жұмыстарына калибрлеу жүргізілді (RAMMS бағдарламасының сипаттамасы 2.3 бөлімінде берілген). Модельді калибрлеу үшін 1977 жылдың 3-31 тамыз аралығында Үлкен Алматы өзен алабында орналасқан №13 мұздықтық-мореналық көлінің ақтарылуынан пайда болған сел тасқынының сипаттамалары алынды (10-кесте).

Кесте – 10. Жүріп өткен сел тасқынының сипаттамалары мен модельдеу нәтижесінде анықталған сел тасқынының сипаттамалары [164]

Сипаттама	3-31.08.1977 ж. жүріп өткен сел тасқынының параметрлері	Модель нәтижесінде анықталған сел тасқынының параметрлері	Айырмашылығы
Сел массасындағы су көлемі, (м ³)	1 млн	2,6 млн	-13%
Сел массасындағы тасындылар көлемі, (м ³)	5 млн	2,5 млн.	
Жалпы көлемі, (м ³)	6 млн	5,3 млн	
Көлдің көлемі, (м ³)	90-100 мың	100 мың	0%
Сел тасқынының максималды жылдамдығы, (м/с)	15	24, 4	38%
Сел тасқынының максималды биіктігі, (м)	20	28	28%
Эрозияның максималды биіктігі, (м)	5	3	-66%

Жүріп өткен сел тасқыны сипаттамалары мен модельденген сел тасқынының сипаттамалары арасындағы сел массасындағы су мен тасындылардың жалпы көлемі арасындағы айырмашылық -13%, максималды жылдамдығы арасындағы айырмашылық 38%, максималды биіктігі бойынша – 28%, эрозияның максималды биіктігі бойынша – 66% құрады.

Осы орайда, зерттеу ауданы бойынша Үлкен Алматы өзені алабындағы ақтарылу қауіптілігі жоғары №13-бис, №1-бис және №10 мұздықтық-мореналық көлдері, Кіші Алматы өзені Алабы бойынша №6 және №1а мұздықтық-мореналық көлдерінің ақтарылуы кезінде пайда болған сел тасқынының жүріп өту жолы 3 сценарий бойынша модельденді. Кіріс параметрлері ретінде әрбір көлдің ЖҚЗ және ГАЗ технологияларының

көмегімен анықталған, сонымен қатар алаптағы жүріп өткен сел тасқындарының анықталған сипаттамалары көлдің көлемі (m^3), максималды өтімі (m^3/c), жылдамдығы (m/c), ағындының бағыты ($^\circ$), тығыздығы (kg/m^3), үйкеліс коэффициенттері алынды.

Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу процесі сел массасындағы тасындылар тығыздығы (kg/m^3), сел массасындағы тасындылар жылдамдығы (m/c), сел массасындағы тасындылардың ықтимал тереңдігі (кПа), ығысудың шекті кернеуі (кПа), максималды қазу тереңдігі (м) мәндерін ескере отырып, 3 түрлі сценарийге негізделді (11.1-11.2-кесте). Зерттеу алабында қалыптасуы мүмкін сел тасқындарының сценарийлері қуаттылығы жоғары, орташа, төмен нұсқада жүзеге асырылды.

Кесте 11.1 Ақтарылу қауіптілігі жоғары мұздықтық-мореналық көлдердің түрлі сценарийлері бойынша таңдалған кіріс параметрлері

Сипаттамалар	Қуаттылығы төмен сел тасқыны үшін	Қуаттылығы орташа сел тасқыны үшін	Қуаттылығы жоғары сел тасқыны үшін
Құрғақ кулондық үйкеліс (μ) коэффициенті	0,05	0,05	0,05
Тұтқыр-турбулентті үйкеліс (ξ) коэффициенті	200	200	200
Тасындының тығыздығы (kg/m^3)	2300	2300	2300
Тасындының жылдамдығы (m/c)	0,050 (ылғалы мол бос сынықты материалдар)	0,025 (ылғалы орташа бос сынықты материалдар)	0,025 (ылғалы орташа бос сынықты материалдар)
Ықтимал қазу тереңдігі (кПа)	0,2 (терең)	0,1 (орташа)	0,05 (таяз)
Максималды қазу тереңдігі (м)	3	1	0,5
Ығысудың шекті кернеуі (кПа)	1,5 (жоғары)	1 (орташа)	0,5 (төмен)

Кесте 11.2 – Қуаттылығы жоғары, орташа, төмен сел тасқындары үшін модельдеу нәтижелері

№	Сел массасындағы су көлемі, (млн m^3)			Сел массасындағы тасындылар көлемі, (млн m^3)			Сел тасқынының максималды биіктігі, м			Сел тасқынының максималды жылдамдығы, м/с			Сел тасқынының максималды қысымы, кПа		
	жоғары	орташа	төмен	жоғары	орташа	төмен	жоғары	орташа	төмен	жоғары	орташа	төмен	жоғары	орташа	төмен
№13-бис	6,4	1306565	457793	6220508	1125508	276742	58	22	6	21	17	13	1017	705	428

№1- бис	8751965	1941705	251311	8611439	1801263	110806	62	26	7	39	27	11	3561	1664	293
№8	418774	260418	211213	242296	84034	34883	9	7	6	10	10	10	242	242	242
№1а	1848715	239797	188431	1668457	59533	8166	31	11	8	21	13	10	1056	389	235
№6	901551	351175	254504	720456	170218	73585	33	14	8	19	13	10	907	390	276

Қауіпті көрініс беретін оқиға әлеуметтік және экономикалық шығындарға немесе қоршаған ортаға зиян келтіруі мүмкін табиғи процестің немесе көрініс беретін оқиғаның пайда болуының ықтималдығы ретінде анықталады [165]. Техникалық тұрғыдан қауіпті көрініс беретін оқиға оның пайда болу ықтималдықтарының жиынтығы және мұндай құбылыстың күтілетін қарқындылығы (шамасы) ретінде қарастырылады [163].

$$E=f(P, I)$$

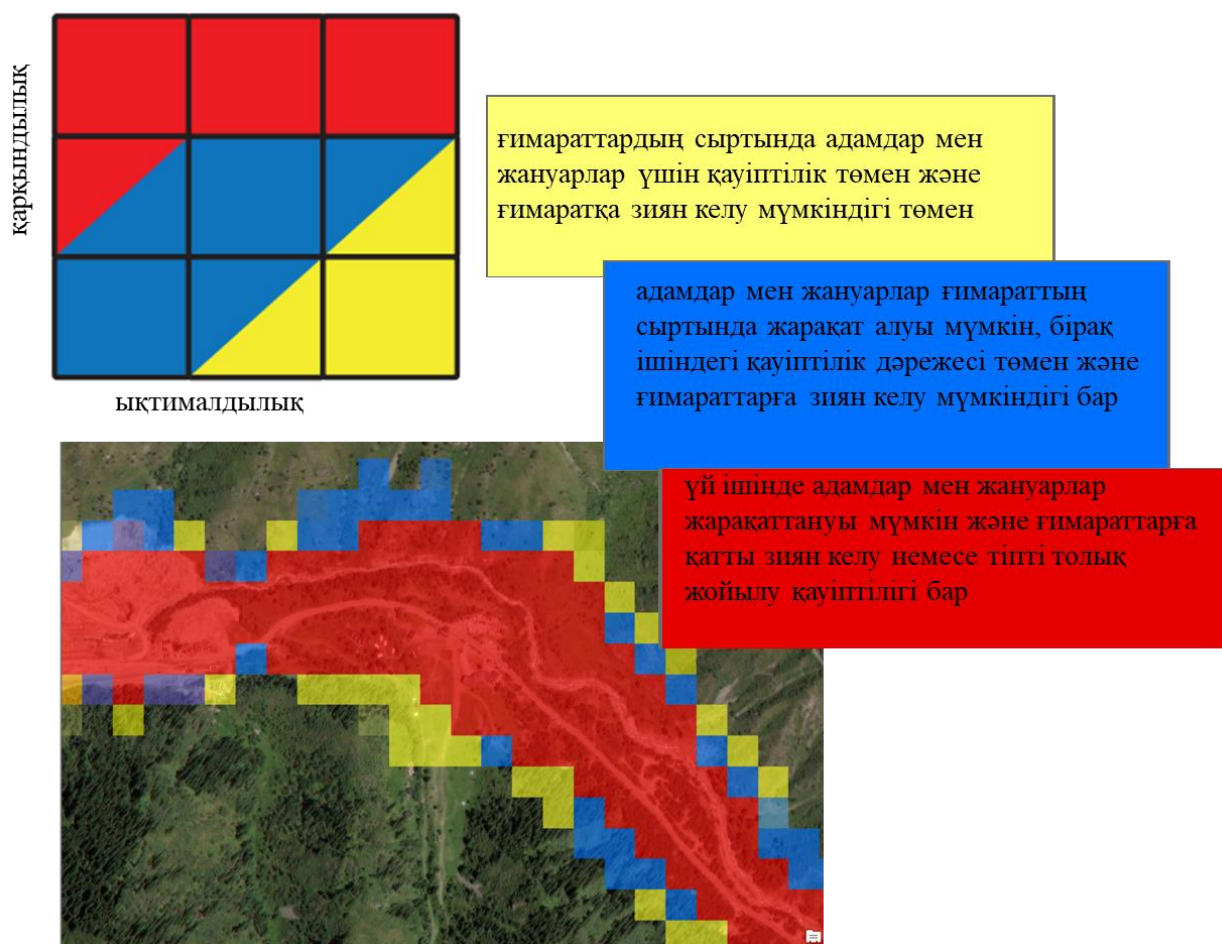
мұндағы E – қауіпті көрініс беретін оқиға, P – ықтималдығы, I – қарқындылығы.

«Қарқындылық» түсінігі бұл жағдайда қарастырылып отырған процеске тән шама ретінде физикалық шаманы қолдану арқылы анықталады, ал «ықтималдық» ұғымын масштаб диапазонына сәйкес кеңірек мағынада қолдануға болады [163].

«Ұшырау» ұғымы – бұл аймақтың ішкі қасиеттері мен динамикалық сипаттамаларына негізделген қауіпті құбылыстың белгілі бір аумақта болу немесе болу мүмкіндігінің (немесе ықтималдығының) салыстырмалы өлшемі. «Ұшырау» түсінігі көрініс беретін оқиғалардың қауіптілігін бағалауда ұзақ уақыт бойы қолданылып келеді және оның нәтижелері көбінесе аумақтың апатқа ұшырайтын аумақтар карталары түрінде ұсынылады. Ұшырау тұрақтылық ұғымымен кері байланысты көрсетеді, яғни көл байламы тұрақсыз болған жағдайда, бұл мұздықтық-мореналық көлдің ақтарылу қауіптілігіне ұшырау мүмкіндігін көрсетеді. «Әсер ету» термині табиғи қауіпті құбылысты тудыратын ықтимал физикалық қауіптілікті сипаттау үшін жалпы термин ретінде пайдаланылады. Қауіпті бағалаудың бұл құрамдас бөлігі потенциалды әсер ету аумағын анықтау және сел тасқынының биіктігі, жылдамдығы сияқты болжамды көрініс беретін оқиғаның қарқындылығы туралы ақпаратты бере отырып, көрініс беретін оқиғаға ұшырайтын аумақтар картасын жасауға негіз болады.

Сценарийлерді модельдеу нәтижесінде қол жеткізілген мәндерге сәйкес қауіптілік дәрежелерін белгілеу үшін Швейцарияның тәжірибелік кодекстерінде қабылданған матрицалық қауіптілікті жіктеу әдісі қолданылды [166]. Сондай-ақ, матрица бірнеше басқа елдерде қолданылатын жіктеу схемаларымен салыстырылды [159], [160], [167].

Ол үшін әрбір сценарий бойынша «3-тен 3-ке дейінгі» матрицалық әдіс негізінде имитацияланған сел тасқынының жүріп өту жолындағы қарқындылық дәрежелері осы сценарийге тағайындалған ықтималдық деңгейімен байланыстырылады (32-сурет).



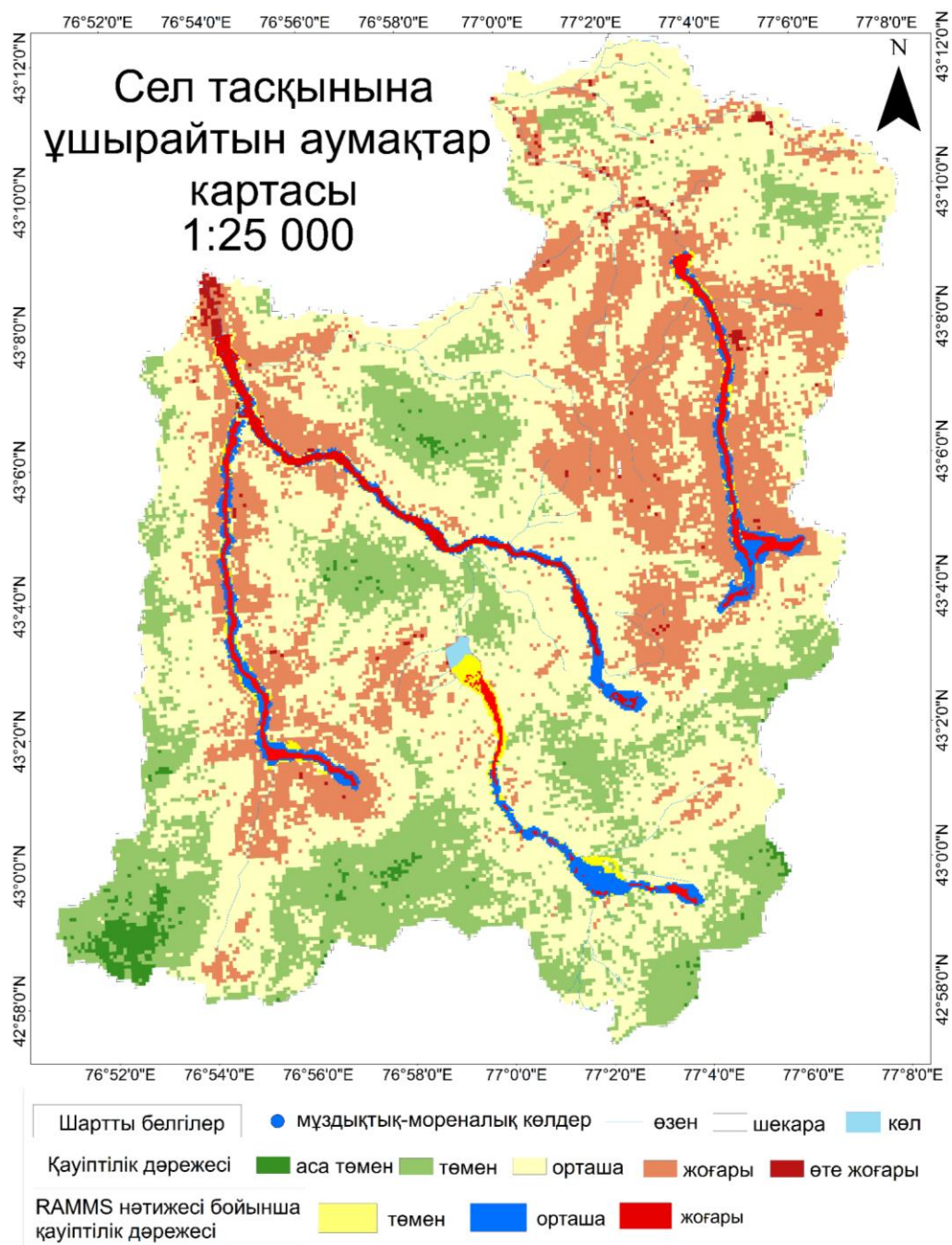
Ескерту: түстер қауіптілік дәрежелеріне сәйкес келеді: қызыл – аса қауіпті, көк – қауіптілігі орташа, сары – қауіптілігі төмен

Сурет 32 – Ықтималдылық пен қарқындылықтың байланыс матрицасы

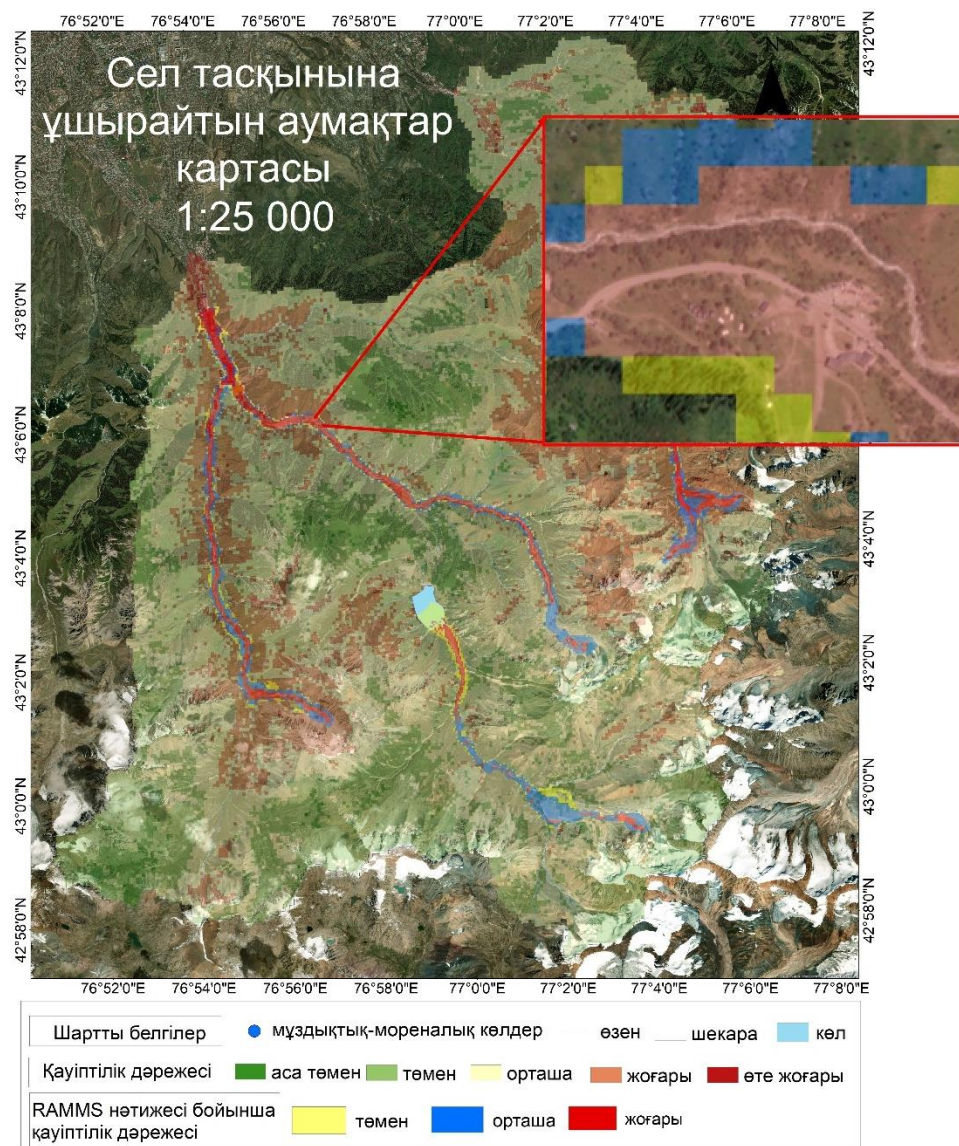
Зерттеу ауданы үшін құрылған қуаттылығы жоғары, орташа, төмен сценарийлердің нәтижелері жоғарыда көрсетілген матрицалық тәсіл негізінде ArcGIS бағдарламасының көмегімен 3 қауіптілік дәрежелеріне бөлінді.

Анықталған қауіптілік дәрежелері өзен арнасы мен арна маңындағы қауіптілікті бағалау үшін аса маңызды. Сол себепті, сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасының (5.1.2 бөлім) өзен арнасы маңына қатысты бөлігін нақтылау мақсатында, модельдеу нәтижесінде анықталған қауіптілік дәрежесі сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасымен қабаттастырылды (33а,ә-сурет).

a)



ә)



Сурет 33 – Модельдеу нәтижесінде дәлдігі нақтыланған сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы

Қорытындылай келе, Іле Алатауының орталық бөлігінде орналасқан аса қауіпті мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуын модельдеу нәтижесінде сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасының дәлдігі арттырылды. Осылайша, қол жеткізілген нәтиже зерттеу ауданы үшін келесідей тұрғыдан практикалық маңыздылыққа ие болары анық:

- зерттеу нәтижелерін аумақтағы сел қаупін басқару шешімдерін қабылдау кезінде және сел қаупіне ұшырауы мүмкін аумақтарды болжауда қолдану;
- сел қауіпті аумақта жүзеге асырылуы қажет шаралар мен салынуы мүмкін болатын қорғаныс имараттарын жобалау және жоспарлау кезінде оңтайлы, әрі ұтымды шешімдер қабылдауда қолдану;
- халықты сел тасқындарының апатты әсерінен аман алып қалу мақсатында жүзеге асырылатын қорғану және алдын алу жұмыстарының дұрыс, әрі уақытылы жүзеге асуының негізі ретінде қолдану;

- сел тасқындарына ұшырауы мүмкін аумақтарды анықтай отырып, сел қаупін басқару әрекеттерін ұйымдастыру;
- сел тасқындарымен байланысты болуы мүмкін төтенше жағдайларды болжауға негіз бола отырып, апатты құбылыстардың алдын алу бойынша дер кезінде оңтайлы шешімдер қабылдау;
- сел тасқынына ұшырайтын аумақтар бойынша қауіптілігі аса жоғары және жоғары аумақтарды ескере отырып құрылыс аймақтарын жоспарлау және жерді пайдалануды оңтайландыру;
- қауіптілік зоналары бойынша инфрақұрылымды жобалау және салу кезінде қауіптерді азайту үшін құрылыс нормалары мен стандарттарын әзірлеу кезінде пайдалану;
- әзірленген карталар халықты төтенше жағдай кезіндегі ережелермен, эвакуациялау, сақтану шараларымен таныстыру, оқыту кезінде пайдалану;
- апатты сел тасқындарының әсерінен болатын ықтимал экономикалық шығындарды бағалау, алдын алу шараларына инвестицияларды негіздеу кезінде пайдалану;
- әзірленген карталар ландшафттың, климаттың және сел тасқынының қалыптасуына әсер ететін басқа да факторлардың өзгерістерін бақылау.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері сел қаупін (mudflow risk) бағалаудың негізгі құраушылары болып саналатын сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аумақтарды анықтау мүмкіндіктері мен жолдарын ұсынады.

Климаттың ғаламдық жылынуы жағдайында биік таулы аймақтағы гидрометеорологиялық, гляциологиялық, геоморфологиялық, геоботаникалық өзгерістердің әсерінен зерттеу ауданындағы сел тасқыны қаупін қайта бағалауды қарастырған жөн. Ол үшін жоғарыда келтірілген зерттеу нәтижелері, қашықтықтан зондтау және ГАЖ технологияларын қолдану жолдары, сондай-ақ мәліметтерді талдау әдістері сел қаупін бағалауда сенімді нәтиже берері анық.

Сел қаупін бағалау сел қауіптілігі мен сел тасқынына ұшырайтын аудандарды есепке алу негізінде жүзеге асырылуы керек. Ал сел қаупі дегеніміз белгілі бір уақыт аралығында нақты бір ауданда сел қауіптілігінің орын алуымен байланысты күтілетін шығындар арқылы түсіндіріледі [152].

Сел қаупі – аумақтағы әлеуметтік, экологиялық және экономикалық сфераларға сел тасқынының теріс әсер ету қауіптілігі. Қандай да бір аумақтағы сел қаупінің шамасы қуаттылығы әр түрлі сел тасқындарының қалыптасу ықтималдығына (қалыптасу қаупі) және олардың адамға, табиғатқа, шаруашылық объектілеріне келтіретін ықтимал шығынына (әсер ету қаупі) байланысты (Акимов В.А. и др., 2004; Медеу А.Р., и др., 2018; Медеу А.Р. и др., 2004; Медеу А.Р., 2003; Тасболат Б. и др., 2015).

Мультикритериялық шешім қабылдау әдісі арқылы біріктірілген сел тасқынының қауіптілік картасы және сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасы апатты сел тасқыны кезінде әрекет ету және авариялық-құтқару қызметтерін ұйымдастырумен айналысатын ұйымдар үшін пайдалы ресурс бола алады.

Сонымен қатар, алғаш рет Іле Алатауының орталық бөлігінде орналасқан аса қауіпті мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуын модельдеу нәтижесінде сел тасқынына ұшырайтын аумақтар картасының дәлділігі арттырылып, сел тасқынының жүріп өту жолындағы қауіптілік деңгейі нақтыланды. Зерттеу нәтижелері аумақтағы сел қаупін басқару шешімдерін қабылдау кезінде және сел қаупіне ұшырауы мүмкін аумақтарды болжау кезінде қажет болуы мүмкін. Сондай-ақ, қол жеткізілген нәтижелер сел қауіпті аумақта жүзеге асырылуы қажет шаралар мен салынуы мүмкін болатын қорғаныс имараттарын жобалау және жоспарлау кезінде оңтайлы, әрі ұтымды шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретіндігі сөзсіз. Ал, ол өз кезегінде халықты сел тасқындарының апатты әсерінен аман алып қалу мақсатында жүзеге асырылатын қорғану және алдын алу жұмыстарының дұрыс, әрі уақытылы жүзеге асуының негізі болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Медеуов А., Колотилин Н.Ф., и Керемкулов В.А., Сели Казахстана. Алматы, 1993.
- [2] Медеу А.Р., Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления, Институт географии, Том 1. Алматы, 2011.
- [3] Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л., Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования., Институт географии, Том 4. Алматы, 2016.
- [4] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л., и Степанов Б.С., Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы мониторинга в Иле Алатау., Институт географии, Том 2. Алматы, 2018.
- [5] Милюков Ф.Н., Основные проблемы физической географии. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1967.
- [6] Токмагамбетов Г.А., Судаков П. А, Плеханов П. А., «Гляциальные сели Заилийского Алатау и пути их прогноза», МГИ: Хроника обсуждения, №39, сс. 97–101, 1980.
- [7] Кубрушко С.С., Ставицкий Я. С., «Гляциальные озера Киргизии и их роль в формировании селей», Материалы гляциологических исследований: хроника, обсуждение, №32, сс. 59–62, 1978.
- [8] Керемкулов В.А., «Морфометрические характеристики и классификация моренных озер», Селевые потоки, №9, 1985.
- [9] Шатравин В.Н., Ставицкий Я. С., «Методические основы выявления селеформирующих факторов при детальном обследовании высокогорных озер», Селевые потоки, №8, сс. 83–92, 1984.
- [10] Westoby, Matthew J., Neil F. Glasser, Michael J. Hambrey, James Brasington, John M. Reynolds, Mohamed A. A. M. Hassan, «Reconstructing historic glacial lake outburst floods through numerical modelling and geomorphological assessment: Extreme events in the Himalaya», *Earth Surf Process Landf*, т. 39, №12, pp. 1675–1692, 2014, doi: 10.1002/esp.3617.
- [11] Benn, D.I., T. Bolch, K. Hands, J. Gulley, A. Luckman, L. I. Nicholson, D. Quincey, S. Thompson, R. Toumi, и S. Wiseman., «Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards», *Earth-Science Reviews* №114, 1–2. pp. 156–174, 2012 doi: 10.1016/j.earscirev.2012.03.008.
- [12] Shukla, Aparna, Purushottam K. Garg, Smriti Srivastava, «Evolution of glacial and high-altitude lakes in the Sikkim, Eastern Himalaya over the past four decades (1975-2017)», *Front Environ Sci*, №6, 2018, doi: 10.3389/fenvs.2018.00081.
- [13] Gabriel Campbell, X. Li, G. Tongliang, T. Partap, B. R. Arora, B. Soomro, «Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountains of India, Pakistan and China/Tibet Autonomous Region», 2004.

- [14] Степанов Б.С. и Яфязова Р.К., Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Селевые процессы и селетехнические сооружения., Институт географии, Том 3. Алматы, 2014.
- [15] Вилесов Е.Н., «Изменение состояния оледенения Северного макросклона Иле Алатау за 60 лет (1955...2015 гг.)», Гидрометеорология и экология, №3, сс. 56–68, 2015.
- [16] Никитин А.М., «Морфометрия и морфология озер Средней Азии», Труды САНИГМИ, №50, сс. 4–21, 1977.
- [17] Никитин А.М., Озера Средней Азии, Гидрометеиздат. 1987.
- [18] Попов Н.В., «Исследование озер гляциальной зоны юго-востока Казахстана с целью оценки возможности их прорывов и мониторинга селеопасности», Автореф. дис. ... канд. геогр. наук., с. 97, 1986.
- [19] Капица В.П., Шахгеданова М.В., Северский И.В., и Медеу А.Р., «Инвентаризация высокогорных озер Жетысу Алатау с использованием космических снимков Landsat», Вопросы географии и геоэкологии, №1, сс. 65–75, 2018.
- [20] Виноградов Ю.Б., Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки, Гидрометеиздат. 1977.
- [21] Krainer K., Spieler A. «The sedimentary record of ice-dammed lakes in the Otztal Alps (Austria)», Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, №35, 1, pp. 65–86, 1999.
- [22] Ретлисбергер Х., Кассер П., «Восстановление ледника Алалин после его обвала в 1965 г.», Материалы гляциологических исследований, №33, сс. 77–93, 1978.
- [23] Theakstone W., «Basal sliding, movement near the margin of the glacier Osterdalsisen, Norway», Journal of Glaciology, №6, pp. 805–816, 1967.
- [24] Kruger J., «Moraine ridge formation along a stationary ice front in Iceland», Boreas, №22, pp. 101–109, 1993.
- [25] MacLennan J., Jull M., McKenzie D., Slater L., Gronvold K., «The link between volcanism and deglaciation in Iceland», Geochemistry, Geophysics, Geosystems, №3, 11, pp. 1–25, 2002.
- [26] Libouty L., Morales B., Pautre A., Schneider B. «Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru», Journal of Glaciology, №18, 79, pp. 239–254, 1977.
- [27] Stone K., «Alaskan ice-dammed lakes: Arctic Inst», North America, Proj. ONR-67, pp. 86, 1955.
- [28] Post A., Mayo L., «Glacier dammed lakes, outburst floods in Alaska», Hydrologic Investigations Atlas Ha-455: U.S. Geological Survey, pp. 1–10, 1971.
- [29] C. A. Emmer A., «The causes, mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, Himalayas», Acta Universitatis Carolinae, Geographica, т. 48, сс. 5–15, 2013.
- [30] Emmer A., Vilimek V., «New method for assessing the potential hazardousness of glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru», Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., №11, pp. 2391–2439, 2014.

[31] Молчанов Л.А., «Озера Средней Азии», Труды САГУ, №3, 12, сс. 1–79, 1930.

[32] Никитин А.М., Озера Средней Азии, Гидрометеиздат. 1987.

[33] Абдуллаева Ә.С., «Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттары», в «Фараби әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференция материалдары, Алматы: Қазақ университеті, б. 52, 2021,

[34] Баймолдаев Т.А., Касенов М.К., Мусина А.К., и Раймбекова Ж.Т., «Пространственно-временной анализ распределения селевых явлений и пути предупреждения и снижения их разрушительных воздействий в горных и предгорных районах Казахстана», в Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции., Грузия, Тбилиси: Черноморец С.С., Гавардашвили Г.В., 2018.

[35] Медеу А. Р. и Киренская Т.Л., «Паспортизация селевых бассейнов как информационная основа управления селевыми рисками», Вопросы географии и геоэкологии, №2, сс. 31–37, 2011.

[36] Баймолдаев Т., Виноходов В., Казселезащита: оперативные меры до и после стихии. Алматы: Бастау, 2007.

[37] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Степанов Б.С., Ранова С.У., Камалбекова А.Н., и Султанбекова Б.М., «Мониторинг селевой опасности в Иле Алатау», Вопросы географии и геоэкологии, №2, сс. 52–60, 2018.

[38] Медеу А.Р., Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций, Институт географии. Алматы, 2009.

[39] Медеу А.Р., Акиянова Ф.Ж., Бейсенова А.С., Благовещенский В.П., Кунаев И.М., Мальковский И.М., и Нурмамбетов Э.И., Атласное картографирование в Республике Казахстан, Институт географии. Алматы, 2014.

[40] Baymoldayev, T.A., Kasenov M.K., Mussina A.K., Raimbekova Zh.T., «Spatial-temporal analysis of the mudflow phenomena distribution and ways of preventing and reducing their destructive effects in mountainous and foothill areas of Kazakhstan», S. S. Chernomorets and G. V. Gavardashvil, Tbilisi: Universal, 2018, pp. 262–270.

[41] Медеуов А.Р., «Научные основы управления селевыми процессами сейсмоактивных горных геосистем Казахстана», автореф...доктора геогр. наук., 2002.

[42] Kapitsa V., Shahgedanova M., Severskiy I., Kasatkin N., White K., Usmanova Z., «Assessment of Changes in Mass Balance of the Tuyuksu Group of Glaciers, Northern Tien Shan, Between 1958 and 2016 Using Ground-Based Observations and Pléiades Satellite Imagery», Front Earth Sci (Lausanne), №8, 2020, doi: 10.3389/feart.2020.00259.

[43] Чигринец А.Г., Дускаев К.К., Мазур Л. П, Чигринец Л.Ю, Мусина А. К, Жанабаева Ж.А., Ахметова С.Т., Реки мегаполиса Алматы, Қазақ университеті. Алматы, 2021.

[44]Mussina A.K, Raimbekova Zh.T., Shahgedanova M., Barandun M, Narbayeva K, Abdullayeva A., Nyssanbayeva A., «Mountain Resilience: A Tool for Mudflow Risk Management in the Ile Alatau Mountains, Kazakhstan», Mt Res Dev, №43, 1, pp. D1–D10, 2023, doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-22-00004.

[45]Молдахметов М.М., Мусина А.К., Айдарбеков Д.Ж., «Іле Алатауындағы сел ошақтарының биіктік белдеу бойынша үлестірілуі», Гидрометеорология и экология, №2, б.192–202, 2012.

[46]Молдахметов М.М., Мусина А.Қ., «Сел қаупін ауыздықтау процесін ұйымдастыру», ҚазҰУ хабаршысы. География сериясы, №1, 30, б. 83–88, 2010.

[47]Medeu A., Blagoveshchensky V., Gulyayeva T., Ranova S., «Assessment and Mapping of Mudflow Hazard and Mudflow Risk in the Territory of Almaty», в “Abstracts of The Second Eurasian RISK-2020 Conference and Symposium”, Tbilisi, Georgia: AIJR, 2020. doi: 10.21467/abstracts.93.

[48]Medeu A.P., Blagovechshenskiy V.P., Kasatkin N.E., Kapitsa V.P., Kasenov M.K., Raymbekova Z.T., «Glacial debris flows in Zailiysky Alatau over the past 120 years», Led i Sneg, №60, 2, pp.213–224, 2020, doi: 10.31857/S2076673420020035.

[49]Mussina A.K., Abdullayeva A.S., Barandun M., «The importance of conducting research methods to assess the state of glacial-moraine lakes», NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical sciences., №6, 456, pp. 147–155, 2022, doi: doi.org/10.32014/2518-170X.245.

[50]Государственный комитет, «Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям: Организация и проведение работ по изучению селей».

[51]Бекенов К.А., Касенов М. К., Селевая безопасность, 50 лет деятельности Казселезащиты: итоги, эффективность, перспективы. 1973-2023 гг., Zialy baspasy. Алматы, 2023.

[52]Медеу А.Р. и Киренская Т.Л., «Селевые риски и методы их оценки», в Материалы Международного симпозиума «Геологический риск: оценка и уменьшение», Ташкент, 2003, сс. 14–17.

[53]Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан, «Рекомендации по методике и практике проведения мониторинга, оценки риска бедствий с использованием инновационных информационно-коммуникационных технологий».

[54]Минаков Е.П., Чичкова Е. Ф., «Мониторинг чрезвычайных ситуаций с использованием дистанционного зондирования Земли», Приборостроение, № 4, 2009.

[55]Mussina A.K., Zhanabayeva Zh.A., «GIS-technology in the management of mudflow risk», Journal of Geography and Environmental Management, №42, 1, pp. 140–146, 2016, doi: 10.26577/JGEM.2016.1.293.

[56]W. Wang, T. Yao, W. Yang, D. Joswiak, и M. Zhu, «Methods for assessing regional glacial lake variation and hazard in the southeastern Tibetan

Plateau: A case study from the Boshula mountain range, China», *Environ Earth Sci*, №67, 5, pp.1441–1450, 2012, doi: 10.1007/s12665-012-1589-z.

[57]Василенко А.А., «Гидродинамические аварии и их моделирование», *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*, №8, 2017.

[58]G. Meyrat, B. McArdell, K. Ivanova, C. Müller, P. Bartelt, «A dilatant, two-layer debris flow model validated by flow density measurements at the Swiss illgraben test site», *Landslides*, №19, 2. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp.265–276, 2022, doi: 10.1007/s10346-021-01733-2.

[59]G. Meyrat, B. McArdell, C. R. Müller, J. Munch, P. Bartelt, «Voellmy-type mixture rheologies for dilatant, two-layer debris flow models», *Landslides*, № 20, 11. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 2405–2420, 2023, doi: 10.1007/s10346-023-02092-w.

[60]Meyrat, G., J. Munch, A. Cicoira, B. McArdell, C. R. Müller, H. Frey, и P. Bartelt., «Simulating glacier lake outburst floods (GLOFs) with a two-phase/layer debris flow model considering fluid-solid flow transitions», *Landslides*, № 21, 3, pp. 479–497, 2024, doi: 10.1007/s10346-023-02157-w.

[61]Bartelt, P., Y. Buehler, M. Christen, Y. Deubelbeiss, C. Graf, B. McArdell, M. Salz, и M. Schneider, «User manual v1.5 RAMMS Debris Flow». WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Switzerland, Davos, 2013.

[62]Salm B., «Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches», *Ann Glaciol*, №18, pp. 221–226, 1993.

[63]Christen M., Gerber W., Graf Ch., Bühler Y., Bartelt P., Glover, J., McArdell, B., Feistl, T. and Steinkogler, W., «Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit RAMMS (Rapid Mass Movements)», *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, №169, pp. 282–293, 2012.

[64]Яфязова Р.К., *Природа селей Заилийского Алатау: Проблемы адаптации*. Алматы, 2007.

[65]Горбунов А.П. и Северский Э.В., «Высотная геокриологическая поясность горных регионов от Алтая до Тянь-Шаня», *География и водные ресурсы*, т.4, 2018.

[66]<https://earthexplorer.usgs.gov/>, «USGS Earth Explorer».

[67]A. Emmer, J. Klimeš, M. Mergili, V. Vilímek, и A. Cochachin, «882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods», *Catena (Amst)*, №147, pp. 269–279, 2016, doi: 10.1016/j.catena.2016.07.032.

[68]C. Prakash и R. Nagarajan, «Glacial lake inventory and evolution in northwestern indian himalaya», *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, №10, 12, pp. 5284–5294, 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2767098.

[69]F. Muneeb, S. U. Baig, J. A. Khan, и M. F. Khokhar, «Inventory and glof susceptibility of glacial lakes in hunza river basin, western karakorum», *Remote Sens (Basel)*, №13, 9, 2021, doi: 10.3390/rs13091794.

[70]Верещагин Г.Ю., *Методы морфометрической характеристики озер*, Ленинград. Государственный гидрологический институт, 1930.

[71] Григорьев С.В., О некоторых определениях и показателях в озероведении, т.18. Труды Карельского филиала АН СССР, 1959.

[72] Муравейский С.Д., «Очерки по теории и методам морфометрии озер», Реки и озера, сс. 91–125, 1960.

[73] B. K. Govindha Raj, «Remote Sensing based hazard assessment of glacial lakes-A case study from Kumaon Himalaya Understanding geomorphic process using satellite data View project Cryospheric HaZarDs View project», №2, 2, 2009.

[74] Абдуллаева Ә.С., «Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің қазіргі жағдайы», в «Фараби әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференция материалдары, Алматы: Қазақ университеті, 2022, б. 88.

[75] Shrestha, Finu, Xiao Gao, Narendra Raj Khanal, Sudan Bikash Maharjan, Rajendra Bahadur Shrestha, Li zong Wu, Pradeep Kumar Mool, и Samjwal Ratna Bajracharya., «Decadal glacial lake changes in the Koshi basin, central Himalaya, from 1977 to 2010, derived from Landsat satellite images», Journal of Mountain Science, № 14, 10, pp. 1969–1984, 2017, doi: 10.1007/s11629-016-4230-x.

[76] Воробей М.В., Савко А.Ф., и Семенюк А.С., «Применение и сравнение различных индексов с использованием данных спутников (Sentinel-2, Landsat-8)», в ГИС-технологии в науках о Земле : материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Сазонов А.А., Ред., Минск: БГУ, 2022, сс. 334–339.

[77] S. K. McFEETERS, «The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features», Int J Remote Sens, №17, 7, pp. 1425–1432, 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.

[78] J. Chen, H. Gao, L. Han, R. Yu, и G. Mei, «Susceptibility Analysis of Glacier Debris Flow Based on Remote Sensing Imagery and Deep Learning: A Case Study along the G318 Linzhi Section», Sensors, № 23, 14, 2023, doi: 10.3390/s23146608.

[79] J. Li, Y. Sheng, «An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: A case study in the Himalayas», Int J Remote Sens, №33, 16, pp.5194–5213, 2012, doi: 10.1080/01431161.2012.657370.

[80] T. Bolch, J. Peters, A. Yegorov, B. Pradhan, M. Buchroithner, V. Blagoveshchensky, «Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan», Natural Hazards, № 59, 3, pp. 1691–1714, 2011, doi: 10.1007/s11069-011-9860-2.

[81] W. Wang, T. Yao, Y. Gao, X. Yang, и D. B. Kattel, «A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the southeastern Tibetan Plateau», Mountain Research and Development, №31, 2, pp.122–130, 2011, doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00059.1.

[82] Salerno, Franco, Sudeep Thakuri, Carlo D’Agata, Claudio Smiraglia, Emanuela Chiara Manfredi, Gaetano Viviano, и Gianni Tartari, «Glacial lake distribution in the Mount Everest region: Uncertainty of measurement and conditions

of formation», *Glob Planet Change*, №92–93, pp.30–39, 2012, doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.04.001.

[83] M. N. Hanshaw, B. Bookhagen, «Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the cordillera vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru», *Cryosphere*, №8, 2, pp. 359–376, 2014, doi: 10.5194/tc-8-359-2014.

[84] C. Prakash, R. Nagarajan, «Glacial lake changes and outburst flood hazard in Chandra basin, North-Western Indian Himalaya», *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, № 9, 1, cc. 337–355, map. 2018, doi: 10.1080/19475705.2018.1445663.

[85] S. Rinzin, G. Zhang, S. Wangchuk, «Glacial Lake Area Change and Potential Outburst Flood Hazard Assessment in the Bhutan Himalaya», *Front Earth Sci (Lausanne)*, №9, 2021, doi: 10.3389/feart.2021.775195.

[86] A. Sorg, T. Bolch, M. Stoffel, O. Solomina, M. Beniston, «Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)», *Nature Climate Change*, №2, 10, pp. 725–731, 2012. doi: 10.1038/nclimate1592.

[87] Молдахметов М.М., Мусина А.К., «Қазақстан Республикасы сел қауіпті аудандарының зерттелгенділігін бағалау жөнінде», *ҚазҰУ хабаршысы. География сериясы*, №2, 33, б. 34–37, 2011.

[88] V. Kapitsa, M. Shahgedanova, H. MacHguth, I. Severskiy, A. Medeu, «Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modelling», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, №17, 10, pp. 1837–1856, 2017, doi: 10.5194/nhess-17-1837-2017.

[89] Severskiy, I., E. Vilesov, R. Armstrong, A. Kokarev, L. Kogutenko, Z. Usmanova, V. Morozova, и B. Raup, «Changes in glaciation of the Balkhash-Alakol basin, central Asia, over recent decades», *Annals of Glaciology*, №7, 71, pp. 382–394, 2016, doi: 10.3189/2016AoG71A575.

[90] Shahgedanova, Maria, Muhammad Afzal, Wilfried Hagg, Vassiliy Kapitsa, Nikolay Kasatkin, Elizabeth Mayr, Oleg Rybak, Zarina Saidaliyeva, Igor Severskiy, Zamira Usmanova, Andrew Wade, Natalia Yaitskaya, Dauren Zhumabayev, «Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the northern Tien Shan, Central Asia», *Water (Switzerland)*, № 12, 3, 2020, doi: 10.3390/w12030627.

[91] Колотилин Н.Ф., Медеуов А., Тютюкова Н.А., Рындина В.Р., Попов Н.В., «Карта фоновой оценки селеопасности территории Казахской ССР». Алма-Ата, 1989 г.

[92] Абдуллаева Ә.С., «Іле Алатауының орталық бөлігіндегі мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігіне әсер етуші факторлар», в «Жасыл көпір ұрпақтан-ұрпаққа» IX Халықаралық студенттер форумы, Алматы: Қазак университеті, 2022, б. 489–496.

[93] Медеу А.Р., Киренская Т.Л., Тасболат Б., Есжанова А.С., Аскарова М.А., «Оценка риска селевого воздействия», *Вестник КазНУ. Серия географическая*, №2, cc. 104–108, 2004.

[94] Barandun, Martina, Eric Pohl, Kathrin Naegeli, Robert McNabb, Matthias Huss, Etienne Berthier, Tomas Saks, Martin Hoelzle, «Hot Spots of Glacier Mass Balance Variability in Central Asia», *Geophysical Research Letters*, № 48, 11, 2021, doi: 10.1029/2020GL092084.

[95] Вилесов Е.Н., «Изменение размеров горного оледенения Казахстана за вторую половину 20 - начало 21 в.», *Гидрометеорология и экология*, № 2, сс. 43–65, 2016.

[96] Barandun, Martina, Joel Fiddes, Martin Scherler, Tamara Mathys, Tomas Saks, Dmitry Petrakov, Martin Hoelzle, «The state and future of the cryosphere in Central Asia», *Water Secur*, №11, 2020, doi: 10.1016/j.wasec.2020.100072.

[97] V. Aizen, «Tien shan glaciers», *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer Netherlands, 2011, pp. 1179–1181. doi: 10.1007/978-90-481-2642-2_669.

[98] Вилесов Е.Н., Горбунов А.П., Морозова В.Н., Северский Э.В., «Деградация оледенения и криогенез на современных моренах северного Тянь-Шаня», *Криосфера Земли*, №1, сс. 69–73, 2006.

[99] Пальгов Н.Н., Современное оледенение в Заилийском Алатау. Алма-Ата: АН КазССР, 1958.

[100] Вилесов Е.Н., Северский И.В., Морозова В.И., «Изменение ледниковой системы Казахстанского Алтая во второй половине 20 - начале 21 века», *Гидрометеорология и экология*, № 4, сс. 45–60, 2013.

[101] Вилесов Е.Н., «Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.)», *Лед и снег*, №58, 2, сс. 159–170, 2018, doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-159-170.

[102] Плеханов П.А., Гляциальные сели Заилийского Алатау и возможности их прогноза: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент, 1984.

[103] Медеуов А.Р. и Нурланов М.Т., Селевые явления сейсмоактивных территорий Казахстана (Проблемы управления), Каржы-Каражат. Алматы, 1996.

[104] T. Zhang, W. Wang, T. Gao, B. An, T. Yao, «An integrative method for identifying potentially dangerous glacial lakes in the Himalayas», *Science of the Total Environment*, №806, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150442.

[105] Kapitsa, V., Shahgedanova M., Usmanova Z., Severskiy I., Blagovechshenskiy V., Kasatkin N., Mishenin V., Rebrov Yu., Golenko A., «Glacial lakes in the Ile (Zailiiskiy) Alatau: current state, observed changes and potential risks», *Proceedings of the 5th International Conference, S.S. Chernomorets and G.V. Gavardashvili*, Tbilisi: Universal, 2018, pp. 357–366.

[106] Дуйсенов Е.Д., Селевые потоки. Алма-Ата:Казахстан, 1966.

[107] Дуйсенов Е.Д., Селевые потоки в Заилийском Алатау. Алма-Ата: Казахстан, 1971.

[108] T. Bolch, J. Peters, A. Yegorov, B. Pradhan, M. Buchroithner, V. Blagoveshchensky, «Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern tian shan», *Terrigenous Mass Movements: Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, pp. 369–398. doi: 10.1007/978-3-642-25495-6_12.

[109] Wang, Shengjie, Mingjun Zhang, Zhongqin Li, Feiteng Wang, Huilin Li, Yaju Li, и Xiaoyan Huang., «Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960», *Journal of Geographical Sciences*, №21, 2, pp. 263–273, апр. 2011, doi: 10.1007/s11442-011-0843-8.

[110] А. Р. Медеу, В. П. Благовещенский, С. У. Ранова, Н. Е. Касаткин, М. К. Касенов, и Ж. Т. Раймбекова, «Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау», в *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции*, Черноморец С.С. и Висхаджиева К.С., Ред., Таджикистан, Душанбе, 2020, сс. 39–48.

[111] Тасболат Б., Уразбаев А.К., Мұса К.Ш., и Кожабеева З., «Картографическое районирование селевого риска (на примере горных и предгорных районов Юго-Восточного Казахстана)», *Вестник КазНУ. Серия Географическая*, №1, 40, сс. 273–280, 2015.

[112] «Карта селевой опасности территории Республики Казахстан». Щербакова Р.С., КазНИМОСК, РГП «Казселезащита». Алматы: Казгеодезия, 1996.

[113] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., и Ранова С.У., «Оценка и картографирование селевой опасности в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы», *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*, №3, 60, сс. 9–13, 2019.

[114] Frey, Holger, Christian Huggel, Rachel E. Chisolm, Patrick Baer, Brian McArdell, Alejo Cochachin, César Portocarrero, «Multi-Source Glacial Lake Outburst Flood Hazard Assessment and Mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru», *Front Earth Sci (Lausanne)*, №6, 2018, doi: 10.3389/feart.2018.00210.

[115] V. González-Prida, P. Viveros, L. Barbera, A. C. Márquez, «Dynamic analytic hierarchy process: AHP method adapted to a changing environment», *Journal of Manufacturing Technology Management*, №25, 4, pp. 457–475, 2014, doi: 10.1108/JMTM-03-2013-0030.

[116] T. Saranya, S. Saravanan, J. J. Jennifer, L. Singh, «Assessment of groundwater vulnerability in highly industrialized Noyyal basin using AHP-DRASTIC and Geographic Information System», *Disaster Resilience and Sustainability*, Elsevier, 2021, pp. 151–170. doi: 10.1016/B978-0-323-85195-4.00009-3.

[117] ASF Data Search, «<https://search.asf.alaska.edu/>».

[118] Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover, «<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>».

[119] Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas (CHELSA), «<https://chelsa-climate.org/downloads/>».

[120] Karger, Dirk Nikolaus, Olaf Conrad, Jürgen Böhner, Tobias Kawohl, Holger Kreft, Rodrigo Wilber Soria-Auza, Niklaus E. Zimmermann, H. Peter Linder, и Michael Kessler, «Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas», *Scientific Data*, №4, 1, p. 170122, 2017, doi: 10.1038/sdata.2017.122.

[121] Copernicus Data Space Ecosystem, «<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> ».

- [122] Ө.О.Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, «Жетісу алабының топырақ картасы», 2005.
- [123] «HydroSHEDS database».
- [124] OpenStreetMap, «<https://download.geofabrik.de/asia.html>».
- [125] Алматы қаласы цифрландыру басқармасының қолдауымен «Digital Almaty», «<https://digital-almaty.kz/ru/content/karta-naseleniya-goroda-almaty>».
- [126] Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар басқармасы, «<https://www.gov.kz/memleket/entities/emer?lang=kk>».
- [127] Harrison, Stephan, Jeffrey S. Kargel, Christian Huggel, John Reynolds, Dan H. Shugar, Richard A. Betts, Adam Emmer, Neil Glasser, Umesh K. Haritashya, Jan Klimeš, Liam Reinhardt, Yvonne Schaub, Andy Wiltshire, Dhananjay Regmi, Vít Vilímek, «Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods», *Cryosphere*, №12, 4, pp. 1195–1209, 2018, doi: 10.5194/tc-12-1195-2018.
- [128] Medeu, Akhmetkal R., Nikolay V. Popov, Viktor P. Blagovechshenskiy, Maulken A. Askarova, Alikhan A. Medeu, Sandguash U. Ranova, Aidana Kamalbekova, и Tobias Bolch, «Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan», *Earth-Science Reviews*, №229. Elsevier B.V., 2022. doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103999.
- [129] Ниязов Р.А., Минченко В.Д., Ташматов Х.М., Мониторинг экзогенных геологических процессов. Ташкент, 1991.
- [130] Деговец А.С., «О масштабах селей и стратегии противоселевой защиты в Казахстане», *Вестник АН КазССР*, №1, сс. 40–44, 1989.
- [131] Li, Xiaoqian, Xinlin He, Xiaolong Li, Yongjun Du, Guang Yang, Dongbo Li, Wenhe Xu., «Spatiotemporal Evaluation and Estimation of Precipitation of Multi-Source Precipitation Products in Arid Areas of Northwest China—A Case Study of Tianshan Mountains», *Water (Switzerland)*, №14, 16, 2022, doi: 10.3390/w14162566.
- [132] H. Du, J. Xia, Y. Yan, Y. Lu, J. Li, «Spatiotemporal Variations of Extreme Precipitation in Wuling Mountain Area (China) and Their Connection to Potential Driving Factors», *Sustainability (Switzerland)*, №14, 14, 2022, doi: 10.3390/su14148312.
- [133] Соколов С.И., Ассинг И.А., Курмангалиев А.Б., Серпиков С.К., Почвы Алма-Атинской области. Алма-Ата: Институт почвоведения, 1962.
- [134] Y. Saadi, A. Suroso, I.B. Giri Putra, «Identification of Suspended Sediment Concentration in Stream Network», *Applied Mechanics and Materials*, №845, pp. 3–9, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.845.3.
- [135] Петрушина М.Н., «Влияние лавинной и селевой активности на современное состояние ландшафтов Западного Кавказа», *Вестник Московского государственного гуманитарного университета им. М.А. Шолохова. Серия «Социально-экологические технологии»*, №1, 2, 2015.
- [136] L. Xiao, Y. Zhang, T. Ge, C. Wang, M. Wei, «Analysis, Assessment and Early Warning of Mudflow Disasters along the Shigatse Section of the China-

Nepal Highway», *Open Geosciences*, № 12, 1, pp. 44–58, 2020, doi: 10.1515/geo-2020-0004.

[137] H. Dutal, «An Index Based Assessment of Debris Flow Susceptibility by Using SPI (Stream Power Index) and TWI (Topographic Wetness Index)», 2nd International conference on innovative academic studies, 2023, pp. 633–640.

[138] Ennaji Nadia, Ouakhir Hasan, Halouan Said, Abahrour Mohamed, «Sediment Transport Index (STI) modeling using the GIS at Small Agricultural Catchment», *International Journal of Innovative Research in Sciences and Engineering Studies (IJIRSES)*, № 2, 11, pp. 16–20, 2022.

[139] I.D. Moore, G.J. Burch, «Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects», *Transactions of the ASAE*, № 29, 6, pp. 1624–1630, 1986, doi: 10.13031/2013.30363.

[140] Di, B.F., N.S. Chen, P. Cui, Z. L. Li, Y.P. He, Y.C. Gao, «GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China», 2008.

[141] Y.O. Ouma, R. Tateishi, «Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment», *Water (Switzerland)*, №6, 6, pp. 1515–1545, 2014, doi: 10.3390/w6061515.

[142] N. Dragičević, B. Karleuša, N. Ožanić, «Different approaches to estimation of drainage density and their effect on the Erosion Potential Method», *Water (Switzerland)*, №11, 3, 2019, doi: 10.3390/w11030593.

[143] H. Dutal, «Land Use Change and Its Effects on NDVI The Case of Espiye District, Türkiye», International academic studies conference, 2023, pp. 203.

[144] Doan, Viet Long, Ba-Quang-Vinh Nguyen, Hung T. Pham, Chi Cong Nguyen, и Cuong Tien Nguyen, «Effect of time-variant NDVI on landside susceptibility: A case study in Quang Ngai province, Vietnam», *Open Geosciences*, №15, 1, 2023, doi: 10.1515/geo-2022-0550.

[145] M.L. Edamo, K. Bushira, T.Y. Ukumo, «Flood susceptibility mapping in the Bilate catchment, Ethiopia», *H2Open Journal*, № 5, 4, pp. 691–712, 2022, doi: 10.2166/h2oj.2022.128.

[146] C. Ballerine, «Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support Will and DuPage Counties, Illinois Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support», 2017.

[147] Long Ngo, «Approximation Method of Analytic Hierarchy Process (AHP) as developed by Dr T.L. Saaty and others», doi: 10.31220/osf.io/87xr4.

[148] Ершова Н.М., «Принятие решений на основе метода анализа иерархий», *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, №9, 210, сс. 39–46, 2015.

[149] J.E. Leal, «AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method», *MethodsX*, №7, 2020, doi: 10.1016/j.mex.2019.11.021.

[150] Саати Т., «Метод анализа иерархий», Москва, 1993.

[151] Мусина А.К., Абдуллаева Ә.С., «Іле Алатауының орталық бөлігіндегі өзен алаптарының сел қауіптілігін бағалау және зоналау»,

Гидрометеорология и экология, №4, 111, б. 34–60, 2023, doi: doi:10.54668/2789-6323-2023-111-4-34-60.

[152] Гладкевич Г.И., Терский П.Н., и Фролова Н.Л., «Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации», Водное хозяйство России, № 2, сс. 29–44, 2012.

[153] Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата, «Управление рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата», 2012.

[154] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Гуляева Т.С., Жданов В.В., Танбаева А.А., Касаткина Т. А., Диких И.А., «Селебезопасность Республики Казахстан: научное обоснование системы обеспечения селебезопасности в горных и предгорных районах Иле Алатау», Алматы, 2019.

[155] Бурова В.Н., Заиканов В.Г., Заиканова И.Н., Минакова Т.Б., Пырченко В.А., Булдакова Е.В., Сависько И.С., «Подходы к оценке уязвимости объектов экономики и территорий при возникновении ЧС природного характера», в Проблемы снижения природных опасностей и рисков. Материалы Международной научно-практической конференции «ГЕОРИСК-2012», Мавлянова Н.Г., Ред., Москва: Российский университет дружбы народов, 2012, сс. 279–284.

[156] Бюро национальной статистики агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан, «<https://stat.gov.kz/ru/region/>».

[157] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Гуляева Т.С., Жданов В.В., Танбаева А.А., Касаткина Т. А., Диких И.А., «Селебезопасность Республики Казахстан: научное обоснование системы обеспечения селебезопасности в горных и предгорных районах Иле Алатау», Алматы, 2018.

[158] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Гуляева Т.С., Жданов В.В., Танбаева А.А., Касаткина Т. А., Диких И.А., «Селебезопасность Республики Казахстан: научное обоснование системы обеспечения селебезопасности в горных и предгорных районах Иле Алатау», Алматы, 2020.

[159] J.M. Lala, D.R. Rounce, D.C. McKinney, «Modeling the glacial lake outburst flood process chain in the Nepal Himalaya: reassessing Imja Tsho's hazard», Hydrology and Earth System Sciences, №22, 7, pp. 3721–3737, 2018, doi: 10.5194/hess-22-3721-2018.

[160] C. Huggel, A. Käb, W. Haeberli, B. Krummenacher, «Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps», Natural Hazards and Earth System Sciences, №3, 6, pp. 647–662, 2003, doi: 10.5194/nhess-3-647-2003.

[161] W. Haeberli, «Investigating glacier-permafrost relationships in high-mountain areas: historical background, selected examples and research needs», Geological Society, London, Special Publications, №242, 1, pp. 29–37, янв. 2005, doi: 10.1144/GSL.SP.2005.242.01.03.

[162] S.K. Allen, A. Linsbauer, S.S. Randhawa, C. Huggel, P. Rana, A. Kumari, «Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: an integrative

and anticipatory approach considering current and future threats», *Natural Hazards*, № 84, 3, pp. 1741–1763, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2511-x.

[163] H. Frey, W. Haeberli, A. Linsbauer, C. Huggel, F. Paul, «A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, №10, 2, pp. 339–352, фев. 2010, doi: 10.5194/nhess-10-339-2010.

[164] Лаптев В.И., «Описание селевого потока 3–4 августа 1977 г. в бассейнах рек Кумбельсу и Большой Алматинки», *Селевые потоки*, №5, сс. 55–59, 1990.

[165] C. Huggel, A. Käab, W. Haeberli, P. Teysseire, F. Paul, «Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps», *Canadian Geotechnical Journal*, №39, 2, pp. 316–330, 2002, doi: 10.1139/t01-099.

[166] Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D., Tripet J., «Hazard assessment in Switzerland - Codes of Practice for mass movements», *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, №61, 3, pp. 263–268, 2002, doi: 10.1007/s10064-002-0163-4.

[167] M. Hürlimann, R. Copons, J. Altimir, «Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach», *Geomorphology*, №78, 3–4, pp. 359–372, 2006, doi: 10.1016/j.geomorph.2006.02.003.

[168] Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н., *Риски в природе, техносфере, обществе и экономике*. Москва: Деловой экспресс, 2004.