

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-4-57-74.46>

ӨОЖ 556

FTAMP 37.27.23; 37.29.02

А. К. Мусина<sup>1</sup>, Ә. С. Абдуллаева<sup>2</sup>, М. Н. Тұрсынғали<sup>\*3</sup>, Қ. М. Наконова<sup>4</sup>, С. Е. Қайрат<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Г. ғ. к., қауымдастырылған профессор

(Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; [Ainur.Musina@kaznu.edu.kz](mailto:Ainur.Musina@kaznu.edu.kz))

<sup>2</sup> PhD, доцент м.а. (Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; [Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz](mailto:Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz))

<sup>3\*</sup> PhD докторант, оқытушы

(Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; [Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz](mailto:Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz))

<sup>4</sup> PhD докторант, кіші ғылыми қызметкер (Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ,

«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; [nakonova\\_kymbat3@live.kaznu.kz](mailto:nakonova_kymbat3@live.kaznu.kz))

<sup>5</sup> Магистрант (Өл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; [kairat\\_saule@live.kaznu.kz](mailto:kairat_saule@live.kaznu.kz))

## ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ СОЛТҮСТІК БЕТКЕЙІНІҢ ОРТАЛЫҚ ЖӘНЕ ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ ҮЛЕСТІРІЛУІН ТАЛДАУ

**Аннотация.** XX ғасырдың II жартысынан бастау алған ғаламдық жылынудың нәтижесінде байқалған мұздықтардың шегінуі көпжылдық тоң қабаттарындағы мореналардың ішінара еруімен қатар жүреді, бұл, өз кезегінде, мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуына ықпал етеді. Зерттеу аумағындағы мұздықтық-мореналық көлдердің саны мен ауданының артуы олардың қазіргі жағдайы мен өзгеру динамикасының қарқындылығын талдауды қажет етті. Қашықтықтан зондтау және ГАЖ-технологиялары көлдердің жағдайы туралы жан-жақты және сенімді мәліметтерді талдау және өңдеу негізінде зерттеу аумағындағы инвентаризациялық карталарды жасауға мүмкіндік берді. Бұл зерттеу қашықтықтан зондтау мәліметтері мен ГАЖ-технологиялары көмегімен Іле Алатауының орталық және шығыс бөліктеріндегі мұздықтық-мореналық көлдердегі өзгерістерді жүйелі түрде анықтау және кеңістіктік-уақыттық талдау жүргізе отырып, олардың даму ерекшеліктеріне баға беру мақсатында жасалды. Зерттеу нәтижелері мұздықтық-мореналық көлдерінің жалпы санының 1978 жылдан қазіргі уақытқа дейін 20-дан 82-ге дейін өскенін көрсетті. Зерттеу аумағындағы көлдердің жалпы ауданы 160% өскен, 1978 жылы көлдердің жалпы жиынтық ауданы 192 900 м<sup>2</sup> құраса, қазіргі уақытта оның мәні 536 452 м<sup>2</sup> дейін артқан. Сонымен қатар, мұздықтық-мореналық көлдердің көрініс беруі 2000 жылдарға дейін 3300-3700 м биіктік аралығында болса, 2013 жылы 3300-3800 м, 2021 жылы 3300-3900 м аралығына дейін, ал қазіргі уақытта (2025 ж.) 3600-3800 м және одан жоғары белдеулерде байқалып отыр. Көлдер саны мен ауданының артуы сел тасқындарының қалыптасу ықтималдығын арттырады және өзен ағысының төменгі жағында орналасқан аудандарға қауіп төндіреді. Сондықтан мұздықтық-мореналық көлдерінің кеңістіктік-уақыттық динамикасын бақылау және бағалау қауіпті экзогендік процестерді болжауда және олардың алдын-алуда, сондай-ақ мұздықтық-мореналық көлдерінің ақтарылуы кезіндегі су тасқындары (GLOF) қауіпін басқару стратегияларын әзірлеу үшін ерекше маңызды.

**Түйін сөздер:** мұздықтық-мореналық көлдер, Жерді қашықтықтан зондтау мәліметтері, кеңістіктік-уақыттық өзгерістер, мұздықтық-мореналық көлдердің саны мен ауданы, климаттың ғаламдық жылынуы.

**Кіріспе.** Климаттың ғаламдық жылынуы Іле Алатауы жотасындағы мұздықтар ауданының айтарлықтай азаюына әкеліп соқтыруда. Мұздықтардың шегінуі мұнда XX ғасырдың II жартысынан бастап байқалып келеді [1] және ауа температурасының маусымдық және ұзақ мерзімді жоғарылауымен тығыз байланысты [2]. 1955 жылдан бастап мұздықтар ауданының кейін шегіну жылына орта есеппен 0,76% құрады, ал 1990 жылдардан бастап ол 1,13%-ға дейін өсті [3]. Мұздықтардың шегінуі жас морена шөгінділерінің ашылуымен қатар жүреді, бұл криогендік және посткриогендік процестердің белсендірілуіне әкеледі. Мұздықтардың кейін шегінуімен бір мезгілде байқалатын мәңгі тоң қабаттарындағы мореналарының ішінара еруі еріген сулар мен жаңбыр суларына толы қазаншұңқырлардың пайда болуына ықпал етеді, бұл биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуына, олардың өсуіне, дамуына жағдай жасайды.

Отандық [4, 5] және шетелдік [6-8] зерттеушілердің жарияланымдарында биік таулы аймақтағы су жинақталатын қазаншұңқырлардың қалыптасуы мұздықтармен және қазіргі мореналармен байланысты болғандықтан, оларды мұздықтық-мореналық көлдер деп атайды.

Жалпы Қазақстандағы мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттарын, даму динамикасын, морфометриялық сипаттамаларын зерттеу өткен ғасырдың екінші жартысынан бастап жүргізіле бастады. 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 [9]. Олар зерттеу жұмыстарында бұл көлдердің ақтарылу қауіптілігі бар екендігін және ақтарылған жағдайында қоршаған орта мен ондағы объектілерге айтарлықтай материалдық зиян келтіруі мүмкін екендігін көрсетті.

1970 жылдардан бастап Іле Алатауында мұздықтардың кейін шегінуне байланысты мұздықтық-мореналық көлдер қарқынды пайда бола бастады, бұл мұздық көлдердің ақтарылу (GLOF) қауіптілігін арттырды. Мұздықтық-мореналық көлдердің елеулі кеңістіктік-уақыттық өзгеріштігі олардың морфометриялық және гидрологиялық сипаттамаларын үздіксіз бақылауды және зерттеуді қажет етеді. Сол себепті, Іле Алатауының мұздықтық-мореналық көлдерді зерттеумен отандық зерттеушілер қарқынды айналыса бастады. Өткен ғасырдың 70 жылдарынан бастап Плеханов П. А., Попов В. И., Токмагамбетов Г. А. мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу шарттары мен олардың ақтарылу қауіптілігіне баса назар аударса, 1980 жылдардың орта тұсынан бастап Керемкулов В. А., Медеу А. Р., Токмагамбетов Т. Г., Благовещенский В. П. Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын зерттей отырып, оларды жіктеу жұмыстарын қарқынды жүргізе бастады, сондай-ақ көлдердің құрылымы мен таралуындағы заңдылықтарды анықтады. Осы кездері Іле Алатауы жотасының солтүстік беткейіндегі мұздықтық көлдердің алаптары зерттелді, ең ірі көлдерде аспаптық геодезиялық зерттеулер жүргізілді, алғаш рет көл алаптарының морфометриясы туралы нақты мәліметтер алынды. Сонымен қатар, гляциологтар жұмыстары [9] мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуы ауа температурасының өсуі нәтижесіндегі мұздықтардың кейін шегінуімен тығыз байланысты екендігін көрсетті.

Қазіргі кезде мұздықтық-мореналық көлдер толысып, олардағы су деңгейі көтерілуде. Бұл мәселе жер бедері пішіндерінің, аумақтардың геологиялық және климаттық жағдайларының алуан түрлілігіне байланысты сел тасқыны, жылжымалар, өзен эрозиясы, сияқты қауіпті экзогендік процестердің дамуына және жандануына ықпал етеді [10]. Сел тасқындарының ішінде, мұздықтардың қызметімен сипатталатын гляциалдық селдер ерекше орын алады. Республика аумағында әртүрлі модификациядағы гляциалдық селдер 25%-ды құрайды. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қауіптілігінің артуына ықпал ететін негізгі көрсеткіштер ретінде су бетінің ауданының ұлғаюын, табиғи бөгет арқылы судың шамадан тыс ағып келуін және көл суы температурасының жоғарылауын келтіруге болады [11]. Мұндай оқиғалардың салдарының ауқымы көл суының көлеміне және сел аймағындағы бос сынықты материалдар қорына тікелей байланысты.

Климаттың жылынуына байланысты орын алып жатқан сел қауіптілігінің артуы мұздықтық-мореналық көлдердің динамикасын жүйелі түрде бақылаудың ерекше маңыздылығын көрсетеді. Дегенмен, жердегі және әуеден түсірілімдерге негізделген дәстүрлі мониторинг әдістері баяу, ауа райы жағдайларына тәуелді және айтарлықтай қаражатты қажет ететіндігі белгілі [12]. Бұл шектеулер ауқымды және жетуі қиын аумақтарды қамтитын жоғары дәлдіктегі мәліметтерді алуға мүмкіндік беретін қашықтықтан зондтау және ГАЖ-технологиялары негізіндегі заманауи бақылау әдістері қажет екендігін көрсетті [13].

Кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі жоғары ғарыштық суреттер мен заманауи ГАЖ бағдарламалары көлдердің жағдайы туралы мәліметтерді үнемі, әрі уақытылы жаңартудағы, оларда орын алып жатқан өзгерістердегі тенденцияларды анықтаудағы және әлеуетті қауіптерді модельдеудегі таптырмас құрал. Қашықтықтан зондтау және ГАЖ мәліметтерін кешенді талдау сел қауіптілігін бағалау және оның зиянды салдарын азайтуда басқарушылық шешімдер қабылдау тиімділігін арттырады және әлеуметтік-экономикалық және табиғи объектілерді қорғау үшін қолданылатын көлдер мен мұздықтардың орналасуы және сел қауіптілігі мен сел қауіпті карталары сияқты аналитикалық және тақырыптық карталарды жасауға мүмкіндік береді [14, 15].

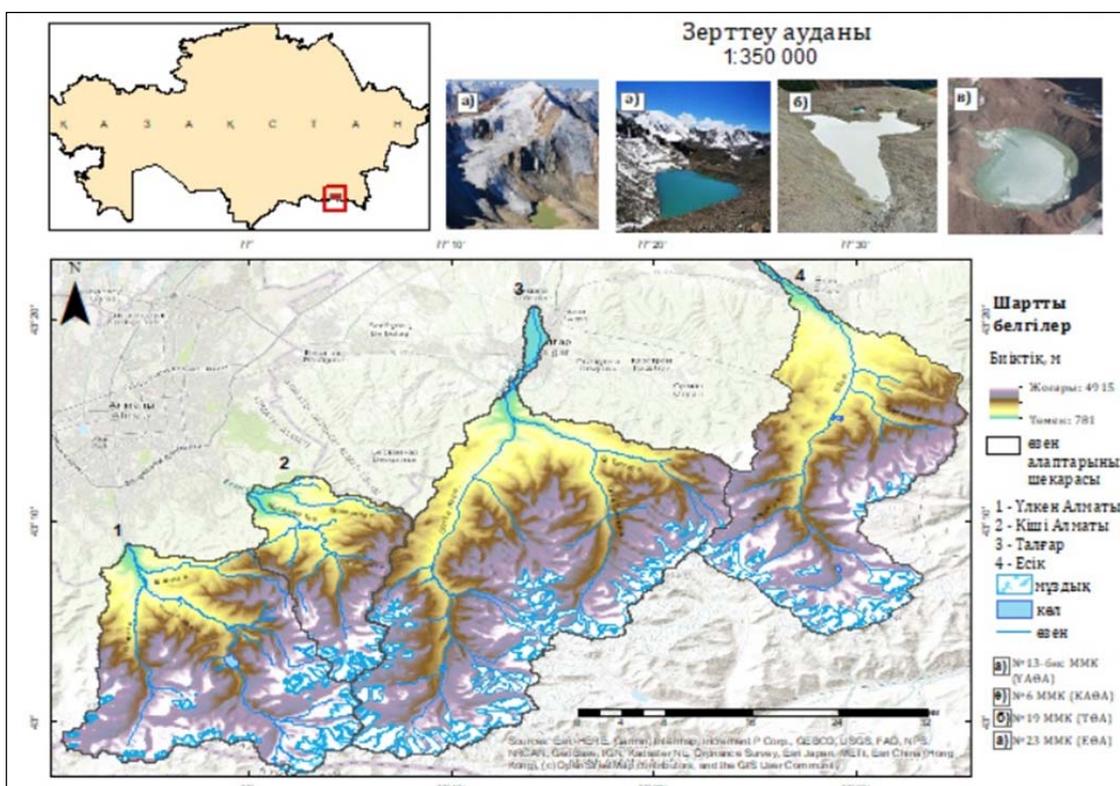
Сондықтан, бұл зерттеудің мақсаты - Іле Алатауының орталық және шығыс бөліктерінде орналасқан мұздықтық-мореналық көлдерді жүйелі түрде инвентаризациялау негізінде олардың кеңістіктік және уақыттық өзгеру қарқындылығын бағалау. Бағалау көлдердің динамикасы мен

қазіргі жағдайын саралауға, олардың эволюциясын анықтауға және мұздықтық-мореналық көлдерінің ақтарылу қауіптілігін бақылау және басқару үшін ғылыми негіз жасауға мүмкіндік береді.

**Зерттеу ауданы.** Іле Алатауы – Тянь-Шань тау жүйесінің солтүстігінде ендік бағытта 190 км созылып жатқан тау жотасы [16]. Жотаның абсолютті биіктігі Талғар шыңында 4973 м жетеді, ал Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің таралу аймағы 3000-3900 м биіктікті қамтиды.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөліктеріндегі негізгі су жинау алаптарына Үлкен және Кіші Алматы, Талғар, Есік өзендері жатады (1-сурет). Бұл өзен алаптары зерттеу ауданының гидрографиялық желісін құрай отырып, Іле Алатауы солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігінің сумен қамтамсыздандырылуында маңызды рөл атқарады. Үлкен Алматы өзені шамамен 3600 м биіктікте орналасқан Үлкен Алматы көлінен бастау алып, оңтүстіктен солтүстікке қарай ағады. Өзеннің ұзындығы 96 км, су жинау алабының ауданы 425 км<sup>2</sup>. Одан шығысқа қарай Кіші-Алматы өзені Тұйықсу мұздығына жақын 3400 м биіктіктен бастау алады. Кіші Алматы өзенінің су жинау алабының ауданы 124,2 км<sup>2</sup>. Талғар өзені алабы күрделі таулы жер бедерімен және айқын тілімденуімен сипатталады. Алаптың солтүстік беткейі тау өзендерінің су жинау алаптарын бөліп тұратын негізгі жотаның бірқатар сілемдері арқылы көрініс береді. Талғар өзені алабының жалпы ауданы 444,5 км<sup>2</sup>, оның ішінде Сол Талғар 273 км<sup>2</sup>, Орта Талғар 103 км<sup>2</sup>, Оң Талғар 68,5 км<sup>2</sup> құрайды. Төменгі ағысында таудан шыға берісінде Сол және Оң Талғар қосылып, Талғар өзенін құрайды. Есік өзені шамамен 3400 м биіктіктегі мұздықтардан бастау алады. Оның ұзындығы 98 км, ал су жинау алабының таулы бөлігінің ауданы 265 км<sup>2</sup>. Өзеннің гидрологиялық режимі ең алдымен мұздықтар мен қардың еруінен қалыптасады, бұл оның ағындысының жылышылық үлестірілуінің айқын сипатын көрсетеді.

Зерттеу аймағы қатаң климаттық жағдайлармен сипатталатын биік таулы нивальды аймақта орналасқан. Зерттеулерге сәйкес [17] Іле Алатауының солтүстік беткейі температура мен жауын-шашынның айқын маусымдық құбылмалылығымен сипатталады. Жауын-шашынның ең көп мөлшері көктем мен күзде басым болатын батыс ауа ағындарының әсері күшейген сәуір-мамыр



1-сурет – Зерттеу ауданы

Figure 1 – Study area

айларына түседі. Орта және биік таулы аймақтарда жауын-шашынның максималды мөлшері маусым-шілде айларына ауысады. Қыс айларында (желтоқсан-қаңтар) нөлден төмен температура басым болады және қатты күйдегі жауын-шашын аз болады. Жазда Азиялық термиялық депрессияның әсерінен оңтүстіктен жылы және құрғақ ауа массаларының адвекциясы күшейеді, нәтижесінде ыстық және ылғалдылығы төмен ауа-райы пайда болады.

Іле Алатауының солтүстік беткейінде орналасқан өзендердің гидрологиялық режимі ең алдымен мұздықтар мен қардың еруінен қалыптасады. Олар қыста тұрақты қар қоры бар жазғы және аралас мұздық-жаңбырлы су тасу режимдерімен сипатталады. Мұз бен қардың еруінен пайда болған еріген сулардың әсері, сондай-ақ температураның шектен тыс ауытқуы зерттеу ауданындағы тау жыныстарының физикалық үгілу процестерінің белсенді жүруіне ықпал етеді. Бұл тау жыныстарының интенсивті бұзылуына және зерттелетін аумақ шегінде сел тасқындарының қалыптасуы кезінде шөгінді материал қызметін атқаратын бос сынықты материалдардың үлкен қорының жинақталуына әкеледі [11]. Зерттеулерге сәйкес [11, 18], сел тасқындарындағы қатты құраушылардың үлесі 80% жетуі мүмкін, бұл Іле Алатауының таулы аймақтарында эрозия және жинақталу процестерінің жоғары потенциалын көрсетеді.

Сонымен қатар, соңғы жылдары 5000 м дейінгі биіктікте нөлдік изотерманың тіркелуіне байланысты Іле Алатауы аймағында белсенді мұздық эрозиялық процестер жүріп жатыр, бұл жаңа мореналық кешендерінің пайда болуына ықпал етеді. Мұздықтардың шегінуі нәтижесінде мұнда биіктігі 150-200 м жететін бірнеше фронтальды қырқалар қалыптасуда. 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 үлкен сынықтардан және ұсақ түйіршікті толтырғыштардан (фракциялары 2 мм кіші) тұратын ірі кесекті жыныстар басым болып келеді [11]. Зерттелініп отырған аймақта кіші мұз дәуірінде жиналған көмілген мұздықтары бар жаңа мореналардың ауданы 91,63 км<sup>2</sup> құрайды [11]. Бұл мореналық кешендер сел тасқындарының қалыптасуында маңызды рөл атқарады, өйткені олар еріген және жаңбыр суымен қозғалысқа ұшырайтын бос сынықты материалдар қорын береді.

Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуына физикалық және химиялық процестер тікелей әсер етеді. Біріншіден, күн сәулесінің тікелей түсуі әсерінен мұздан босап шыққан аумақтарда теріс формадағы микро пішінді ойыстар, шұңқырлар, ойылымдар пайда болып, физикалық процестердің орын алуына ықпал етеді. Екіншіден, мұздықтардың қарқынды еруі әсерінен пайда болған ойыстар, шұңқырлар, ойылымдар сумен толысады және химиялық процестердің көрініс беруі негізінде олардың тереңдігі немесе қазаншұңқырларының аумағы өсе түседі. Осылайша, аталған процестердің орын алуынан толысқан мұздықтық-мореналық көлдер сел қауіптілігінің туындауына алып келеді.

Төтенше жағдайлар атласында [19] ұсынылған сел қауіптілігі картасына сәйкес зерттелетін аумақ сел қауіптілігі ең жоғары аймаққа жатады. Бұл аймақ экзогендік геоморфологиялық процестердің дамуына, әрі қатты ағындының негізгі көзі ретінде мұздықтық-мореналық шөгінділердің жинақталуына бейім.

Сонымен, зерттелетін аумақ күрделі орографиялық құрылыммен, биіктік белгілерінің айтарлықтай өзгеруімен, мұздықтармен қоректенетін өзендердің дамыған жүйесімен сипатталады.

**Зерттеу материалдары мен әдістері.** Өткен ғасырдың 60 жылдарынан бастап мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасу жағдайларын, морфометриялық сипаттамаларын, пайда болатын апаттылық дәрежесін анықтау мақсатында «Қазселденқорғау» ММ жер беті және аэровизуалды барлау жұмыстарын жүргізе бастады. XX ғасырдың 80 жылдарының ортасында «Қазселденқорғау» ММ тапсырысы бойынша таулы аудандардағы мұздықтық-мореналық көлдерді идентификациялау және инвентаризациялау мақсатында көлдердің паспортизациялау құжаттары дайындалған болатын. Мореналық-мұздық көлдерді зерттеу Қазақстанның таулы аймақтарында сел қауіптілігін бағалау және қауіпті азайту шараларын әзірлеу қажеттілігімен тығыз байланысты. Соңғы жылдары жарық көрген Алматы облысы бойынша 832 көлдің кадастры мен олардың морфометриялық және қауіптілік сипаттамалары жүйеленген зерттеу [20] сел қауіпін аймақтық деңгейде бағалап, қауіпті көлдерді анықтауға мүмкіндік беретін құралға айналды.

Мұздықтық-мореналық көлдердегі өзгерістерді зерттеу мультиспектралды суреттерді біріктіру, су бетінің индексі және көлдер ауданының өзгеруін талдау үшін қашықтықтан зондтау

мәліметтеріне негізінде жүзеге асырылады. Сол себепті, зерттелініп отырған аймақтағы мұздық-мореналық көлдердің қазіргі жағдайы мен даму динамикасын бақылау үшін қашықтықтан зондау әдісі арқылы алынған кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі жоғары түсірілімдер, топографиялық карталар, жер бедерінің сандық моделі қолданылды. Көлдердің инвентаризациясын жүргізу барысында, қар қорының минималды шегі байқалатын салыстырмалы түрде құрғақ маусым болып табылатын шілде-тамыз айларына тиесілі 1978-2025 жж. аралығындағы ғарыштық түсірілімдер алынды. Мұздық-мореналық көлдердің инвентаризациясын жүргізу мақсатында бұл жылдардың таңдалып алынуы бұлт және қар қабаттарының минималды шегімен және түсірілімнің жоғары сапасымен түсіндіріледі.

Мұздық-мореналық көлдерді зерттеу барысында 1978 жыл Multispectral Scanner System (MSS), 1990 жыл үшін Thematic Mapper (TM), 1999, 2013 жылдары үшін Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus (TM/ETM+) Landsat, 2021 және 2025 жылдар үшін Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдері пайдаланылды. Сонымен қатар, зерттеу ауданын карта бетіне түсіру үшін жер бедерінің сандық моделі ретінде Alos Palsar (JAXA) халықаралық зерттеу жобасынан алынған мәлімет қолданылды. Осыған байланысты, Sentinel-2 және Landsat ғарыштық спутнигі арқылы түсірілген 10, 30 және 60 м кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі жоғары және орташа түсірілімдер пайдаланылды (1-кесте). Таңдап алынған түсірілімдер арқылы мұздық-мореналық көлдерді идентификациялаудың сенімділігі кеңістікті кескіндеу мүмкіндігімен анықталады. Су объектілерін карта бетіне түсіру міндетін шешуде кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі 10 м болған жағдайда, объектінің сипатты мөлшері 30 м, ал 30 м болған жағдайда 60 м құрайды.

1-кесте – Мәлімет көздері жөніндегі ақпарат

Table 1 – Information on data sources

Мәліметтер көзі	Түсірілімнің жарияланған уақыты	Түсірілім атауы	Кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі
Landsat 2 (USGS)	07.29.1978	LM02_L1TP_161030_19780729_20200906_02_T2	60 м
Landsat 5 (USGS)	07.08.1990	LT05_L2SP_149030_19900807_20200915_02_T1	30 м
Landsat 7 (USGS)	08.08.1999	LE07_L2SP_149030_19990808_20200918_02_T1	30 м
Landsat 8 (USGS)	06.08.2013	LC08_L2SP_149030_20130806_20200912_02_T1	30 м
Sentinel-2 (Copernicus Data Space Ecosystem)	24.07.2021	S2A_MSIL2A_20210724T054641_N0301_R048_T43TFH_20210724T080202	10 м
Sentinel-2 (Copernicus Data Space Ecosystem)	23.07.2025	S2A_MSIL2A_20250723T054641_N0301_R048_T43TFH_20250723T080202	10 м
Alos Palsar (JAXA)			12.5

**Мұздық-мореналық көлдерді идентификациялау.** Зерттеу мақсатына қол жеткізу үшін су индексінің әртүрлі түрлерін қолдануға болады [21]. Зерттеліп отырған мұздық-мореналық көлдерді осы түрлердің бірі NDWI көмегімен де анықтауға болады. Макфитерс анықтаған NDWI [22] 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. Индекстің теңдеуі келесідей анықталады:

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{NIR}}{\rho_{green} + \rho_{NIR}}, \quad (1)$$

мұндағы  $\rho_{green}$  және  $\rho_{NIR}$  – сәйкесінше жасыл және жақын инфрақызыл диапазондар үшін атмосфераның жоғарғы қабаттарының шағылысу коэффициенттері. Бұл шағылысу коэффициенттері ретінде Sentinel-2, Landsat TM және ETM+ сенсорлары үшін тиісті диапазондар алынды.

Мұздық-мореналық көлдер әртүрлі физикалық және химиялық жағдайларға байланысты әртүрлі спектрлік сипаттамаларға ие болғандықтан, көлдердің пиксель мәндері үшін кең NDWI диапазондарын береді. Яғни, зерттелініп отырған аудандағы мұздық-мореналық көлдері үшін

NDWI диапазоны әртүрлі болуы мүмкін. Сол себепті, олар қандай да бір шекті мәнмен шектелмейді.

Көптеген зерттеушілер [23, 24] мұздықтық-мореналық көлдерді идентификациялау үшін 0,15 шекті мәнін қабылдаған. Сол себепті, зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдерді идентификациялау барысында 0,15-0,20 диапазонындағы NDWI мәндері қолданылды. Landsat 5, Landsat 7 ғарыштық түсірілімдерінен су индексін анықтау үшін 2-4 Band-тер, Landsat 8 космостық түсірілімінен 3-5 Band-тер және Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдерінен 3-8 Band-тер қолданылды.

**Мұздықтық-мореналық көлдерді картаға түсіру және инвентаризациясын әзірлеу.** NDWI индексінің оң диапазоны 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 және Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдеріне сегментация жасалды. Екіншіден, әрбір зерттелініп отырған жылдар үшін алдын-ала алынған нәтижелерді талдай отырып, әрбір жеке көлді қолмен сандау жұмыстары жасалды.

Спектрлік шағылысу нәтижесінде кейбір көлеңкелі аймақтар мұздықтық-мореналық көл ретінде қате классификацияланды. Сол себепті, дұрыс классификацияланбаған немесе анықталмаған көлдерді Google Earth Pro кескіндерімен 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:

зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдерінің атауы;

зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдерінің координаталары;

зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдерінің биіктік белгілері, м;

зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдерінің ауданы, м<sup>2</sup>;

қол жеткізілген аудандық сипаттамалар келесі жіктемелік ерекшеліктер негізінде > 5000 м<sup>2</sup>; 5000-20000 м<sup>2</sup>; 20000 м<sup>2</sup>, сәйкесінше, ұсақ, орташа және ірі көлдер болып бөлінді.

Зерттелініп 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 қабаттары) тәуелді болатын әртүрлі деңгейдегі дәлділікті береді.

Мақалада зерттеу ауданы үшін қателіктерді максималды азайту мақсатында маусым-тамыз айларының ғарыштық түсірілімдер пайдаланылды. Зерттеу барысында Хеншоу мен Букхаген ұсынған әдіске сәйкес [25] мұздықтық-мореналық көлдердің ауданын картаға түсірудегі қателіктер бағаланды. Бұл әдісте ауданды анықтау және өлшеудегі қателік Гаусс үлестірімін қамтиды, яғни көрсетілетін пиксельдердің ~ 69% (1σ) қателіктерге ұшырайды деген болжамға негізделген [26]. Сонымен, аудандардың қателігі келесі формуламен есептеледі:

$$Error(1\sigma) = (P/G) \cdot 0,6872 \cdot G/2, \quad (2)$$

$$E = Error(1\sigma)/A \cdot 100\%, \quad (3)$$

мұндағы P – картаға түсірілген көлдің периметрі; G – тор ұяшығының өлшемі; E – мұздықтық-мореналық көлдің салыстырмалы қателігі; A – мұздықтық-мореналық көлдің жалпы ауданы. Бұл жерде, мұздықтық-мореналық көлдердің шекарасын құрайтын пиксельдер саны көлдің периметрін тор ұяшығының өлшеміне (G) бөлу арқылы есептеледі. Пиксельдердің 69%-ы қателіктерге бейім болғандықтан, мұздықтық-мореналық көлдердің шекарасын құрайтын пиксель 0,6872 (± 1σ) көбейтіледі. Содан кейін, сан бір пиксельдің жарты ауданына көбейтіледі.

Алынған қателер шамамен 5% құрайды, бұл қашықтықтан зондтау әдістері арқылы мұздықтардың контурын бағалайтын зерттеулермен салыстыра отырып белгіленген көрсеткіш [25].

**Нәтижелер.** Іле Алатауы жотасындағы мұздық-мореналық көлдер санының артуы мен олардың су айдынының кеңеюі негізінен климаттың ұзақ мерзімді жылынуы және мұздық массасының кейін шегінуімен байланысты. Мұздықтық-мореналық көлдерінің саны мен көлемінің ұлғаюын климаттың ғаламдық жылынуына байланысты мұздықтардың кейін шегіну процесімен түсіндіруге болады. Мұздықтық-мореналық көлдердің өсуі мен дамуы климаттың өзгеруімен және топографиялық жағдайлармен тығыз байланысты [26]. Климаттық өзгерістерге қатысты зерттеулер көрсеткендей, Солтүстік Тянь-Шаньда температура трендтері оң, және жергілікті мұздықтардың аумағы азайып жатыр [27, 28]. Бұл жылыну, әсіресе жазғы кезеңдегі жоғары абляциямен тығыз байланысты, нәтижесінде кейін шегінген мұздықтар орнындағы мореналық шөгінділермен көмкерілген бос кеңістіктерде су жиналып, жаңа көлдердің пайда болуына жағдай жасалады. Сонымен қатар, жылыну мұз тау жыныстары аралас қоспаның беріктігін төмендетеді, яғни мореналық қабаттың тұрақсыздығына алып келеді, ал бұл, өз кезегінде, көл қалыптасуына қолайлы шарттар туғызады. Зерттеу ауданындағы жергілікті жердің климатының өзгеруін және олардың мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы мен дамуына әсерін бағалау үшін ашық ресурстағы CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) желісінен қолданылған 1978 жылдан 2020 жылға дейінгі ауа температурасының мәліметтерін талдау отырып, оның әрбір он жыл сайын  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа көтерілу тенденциясының бар екендігін көрсетті [29]. Температураның жоғарылауы мұздықтардың шегінуінің және Іле Алатауындағы мұздықтық-мореналық көлдердің пайда болуының және олардың су деңгейлерінің көтерілуі әсерінен зерттеліп отырған аумақта шығу-тегі гляциалды сел тасқындары қалыптасуының негізгі қозғаушы күші болып саналады [28].

Зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық таралуы 2-кестеде келтірілген. Мореналық көлдердің кеңістіктік таралуы зерттеу уақыт аралығында 3000-3900 м қамтығандықтан, осы аралық шартты түрде 3000-3200, 3200-3400, 3400-3600, 3600-3800, 3800 м және одан да жоғары аралықты қамтитын градациялар бойынша бағаланды. Уақыттық үлестірілуі қашықтықтан зондау мәліметтерінің зерттеу ауданына қатысты бар-жоқтығына, сапасына және бұлттылық дәрежесіне байланысты келесі онжылдықтар (1978, 1990, 1999, 2013, 2021, 2025 жж.) бойынша таңдалып, сондай-ақ ғарыштық суреттерді таңдау барысында зерттеу ауданының мұздан арылу мезгілі, яғни жаз айларындағы кескіндері пайдаланылу негізінде талданды.

Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі шығыс және орталық бөліктері бойынша 1978-2025 жылдар аралығында жүргізілген талдау мұздықтық-мореналық көлдердің санының да, олардың аудандарының да тұрақты өсу трендін көрсетеді. 2-кесте мәліметтері бойынша, зерттеу ауданындағы көлдер саны 1978 жылмен салыстырғанда 2025 жылы 2-4 есеге артқан (2-сурет). Бұл тенденция соңғы онжылдықтарда байқалған мұздықтардың қарқынды шегіну процесімен тікелей байланысты, ол Іле Алатауында 1950-жылдардан бері 30-40 % шамасында мұздық көлемінің азаюына алып келгені белгілі.

Үлкен Алматы өзен алабы бойынша 1978 жылы 7 көл тіркелсе, 2025 жылы олардың саны 26-ға жетті. Көлдер ауданы да айтарлықтай артқан:  $F < 5000\text{ м}^2$  ұсақ көлдерден бастап  $20\ 000\text{ м}^2$  асатын ірі көлдерге дейін барлық градацияларда өсу байқалады. Әсіресе XXI ғасырдың бірінші онжылдығынан ірі ( $F > 20\ 000\text{ м}^2$ ) көлдердің пайда болуы мұздықтардың қарқынды еруінің нәтижесі болып табылады.

Талғар өзен алабы ең белсенді өзгерістермен сипатталады. 1978 жылғы 5 көлден 2025 жылы 31 көлге дейін өсім байқалды, ал жалпы ауданы 3 еседен аса артты. Мұнда ауданы  $20\ 000\text{ м}^2$  үлкен көлдердің тұрақты түрде пайда болуы байқалады (3-сурет, А), бұл алаптағы мұздық аймақтарының үлкендігімен және мұздық жамылғысының қарқынды еру процестерімен түсіндіріледі. Бұл тенденция Орталық Азиядағы ең динамикалық көл жүйелерінің дәл осы Талғар жоталарында қалыптасатынын көрсететін ғылыми зерттеулермен сәйкес келеді.

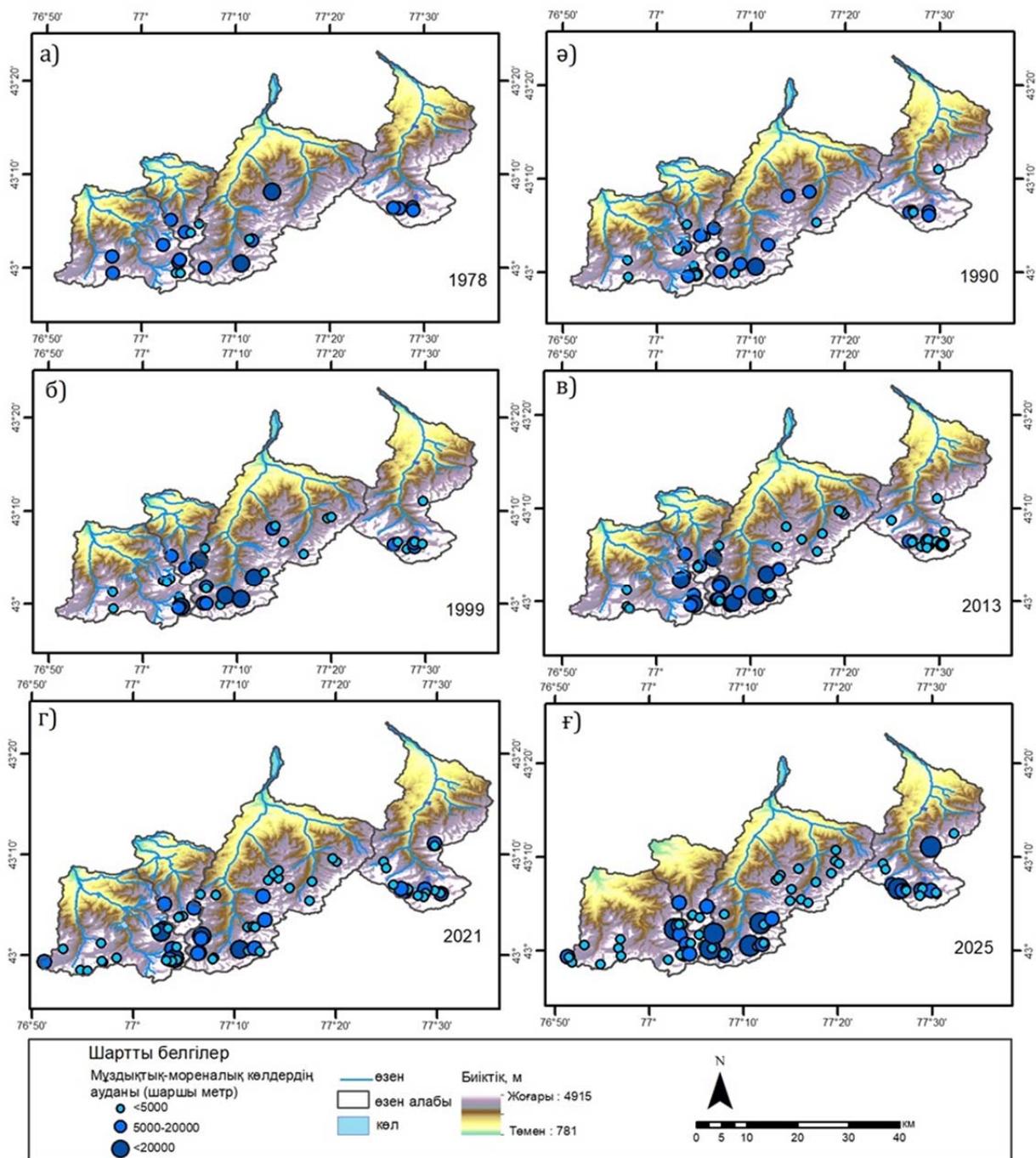
Есік және Кіші Алматы өзен алаптарында да көлдер саны біртіндеп өсуде, бірақ динамикасы Талғар және Үлкен Алматы өзен алаптарына қарағанда баяуырақ. Бұл мұздықтар ауданының салыстырмалы түрде кіші болуы [28, 30] және «Қазселденқорғау» ММ уақытылы жүзеге асырылатын алдын-алу шараларына байланысты.

2-кесте – Іле Алатауы солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық үлестірілуі

Table 2 – Spatial and temporal distribution of glacial-moraine lakes in the central and eastern parts of the northern slope of the Ile Alatau

Жыл	Зерттеу ауданы	ММК жалпы саны	Ауданы (F, м <sup>2</sup> )						Биіктігі (H, м)				
			<5000		5000-20000		20000<		3000-3200	3200-3400	3400-3600	3600-3800	3800<
			саны (N)	F, м <sup>2</sup>	саны (N)	F, м <sup>2</sup>	саны (N)	F, м <sup>2</sup>					
1978	Үлкен Алматы	7	2	5400	5	47 600	–	–	–	–	4	3	–
	Кіші Алматы	4	1	1800	3	24 800	–	–	–	2	2	–	–
	Талғар	5	2	5700	1	7400	2	51 600	–	1	2	2	–
	Есік	4	–	–	4	48 600	–	–	–	1	2	1	–
1990	Үлкен Алматы	9	6	17 500	3	31 100	–	–	–	1	4	4	–
	Кіші Алматы	4	2	4650	2	18 600	–	–	–	2	1	1	–
	Талғар	15	8	20 500	6	57 900	1	66 100	–	5	6	3	1
	Есік	7	4	9350	3	44 250			–	2	3	2	–
1999	Үлкен Алматы	10	8	20 400	1	6100	1	22 950	–	–	6	4	–
	Кіші Алматы	5	2	3800	2	11 400	1	20 800	–	3	1	1	–
	Талғар	20	13	30 300	4	30 250	3	114 250	–	8	7	5	–
	Есік	8	5	9800	3	38 700	–	–	–	2	4	2	–
2013	Үлкен Алматы	11	6	11 250	3	44 200	2	61 750	–		5	6	–
	Кіші Алматы	4	1	2700	2	17 300	1	22 450	–	1	2	1	–
	Талғар	23	12	28 800	7	73 850	4	153 800	2	7	8	6	–
	Есік	14	10	19 600	4	42 300	–	–	–	2	10	2	–
2021	Үлкен Алматы	21	14	26 400	5	52 950	2	76 550			7	13	1
	Кіші Алматы	5	3	6900	2	21 600	–	–		1	3	1	
	Талғар	29	21	44 300	6	66 750	2	103 850	1	10	9	8	1
	Есік	22	17	30 000	5	74 650	–	–		3	13	5	1
2025	Үлкен Алматы	26	18	43 597	7	79 278	1	37 472	–	–	12	11	3
	Кіші Алматы	5	3	8037	2	23 651	–	–	–	2	3	–	–
	Талғар	31	23	39 888	4	38 258	4	178 035	2	7	14	6	2
	Есік	20	12	18 741	5	47 163	1	22 332	–	4	9	4	1

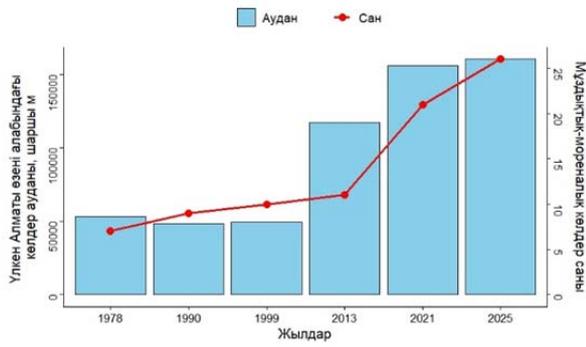
Зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік таралуы негізінен 3000-3900 м биіктік аралығында шоғырланғанын көрсетеді. Бұл биіктік белдеуі соңғы 50 жылда мұздықтардың белсенді түрде шегіну аймақтарына сәйкес келеді. Мысалы, 3000-3200 м биіктік аралығында 1978-1990 жж. қарағанда 2000 жылдан кейін көлдердің саны арта түскен. Мұны мореналардың мұздан толық арылуы және су жинау қазаншұңқырларының тұрақтануымен түсіндіруге болады. 3200-3400 м және 3400-3600 м аралықтары барлық кезеңдерде ең көп көлдер шоғырланған аралық болып табылады. Ірі көлемді ( $F > 20\ 000\ \text{м}^2$ ) көлдердің басым бөлігі осы биіктіктерде кездеседі. Ал 3600-3800 м аралығы да соңғы онжылдықта белсенді көл қалыптасушы аймаққа айналды, әсіресе Талғар мен Үлкен Алматы өзен алаптары үшін. 3800 м-ден жоғары аймақтарда көлдердің пайда болуы тек 1999 жылдан кейін байқалады (3-сурет, Ә).



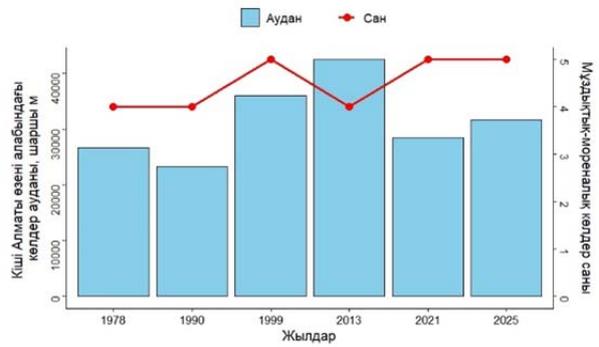
2-сурет – Зерттеу ауданындағы өзен алаптары бойынша 1978-2025 жж. аралығындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық таралуы

Figure 2 – Spatiotemporal distribution of glacial-moraine lakes along river massifs in the study area from 1978 to 2025

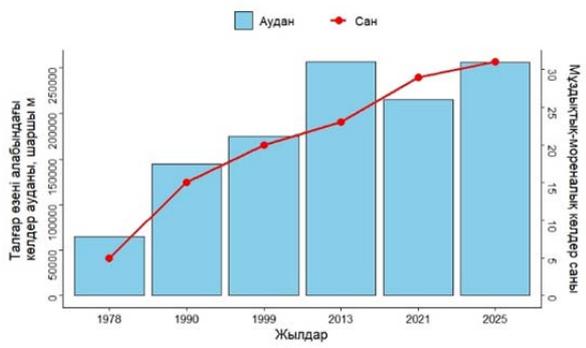
A



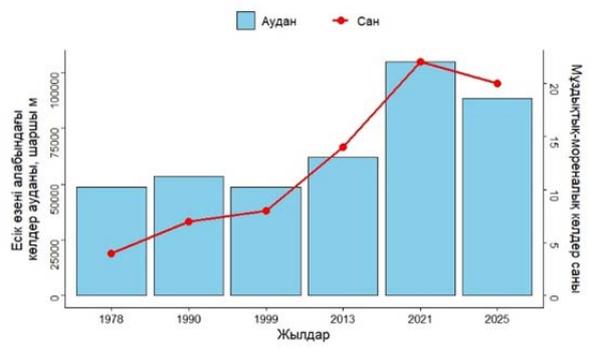
а



ә

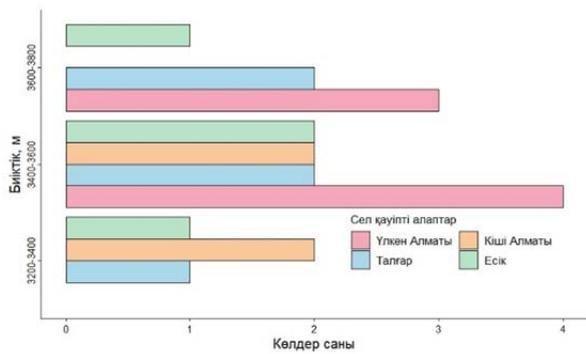


б

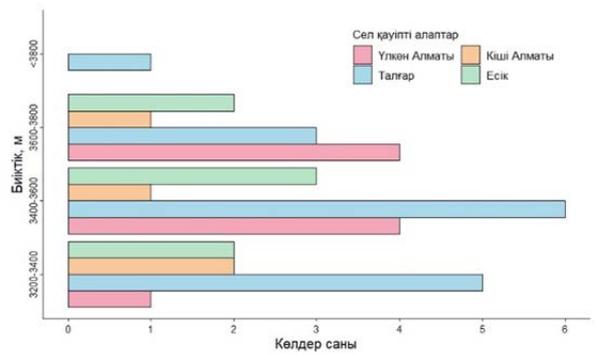


в

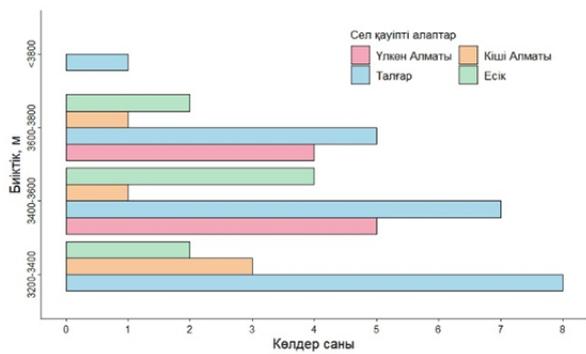
Ә



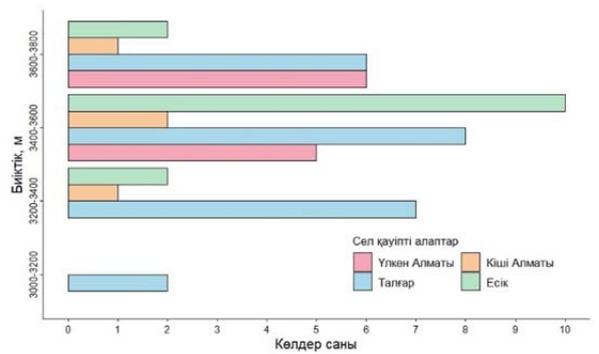
1978



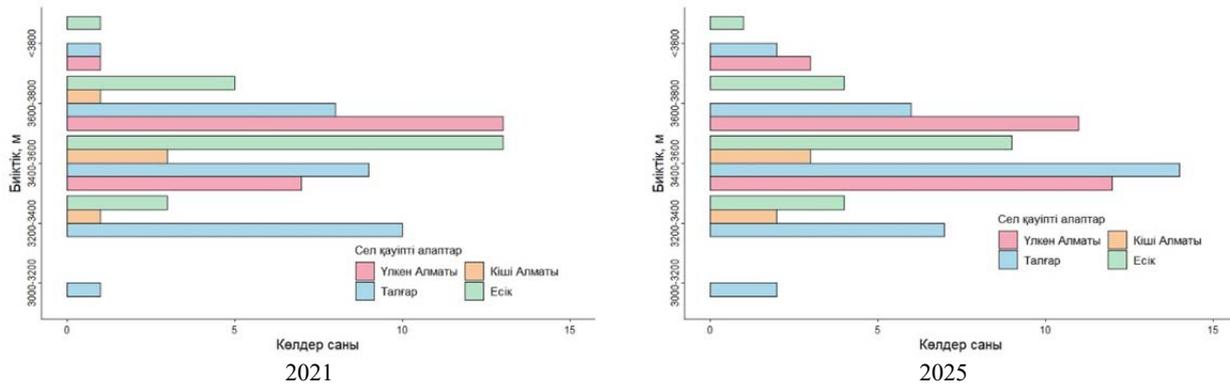
1990



1999



2013



3-сурет – Зерттеу ауданындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 1978-2025 жж. аралығында:  
А – ауданы бойынша өзгеруі; Ә – биіктігі бойынша таралуы

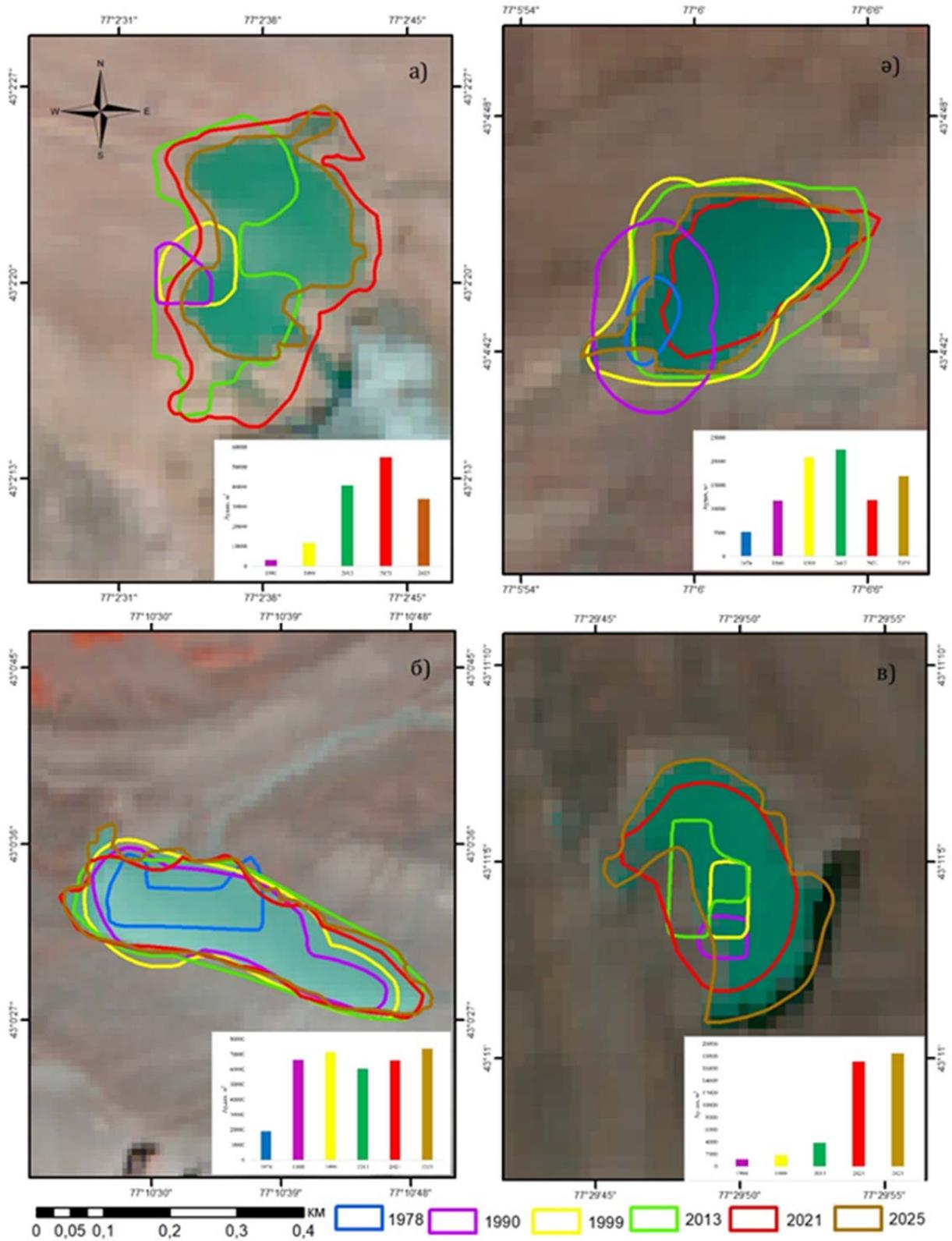
Figure 3 – Distribution of glacial-moraine lakes in the study area by area A – and height B – from 1978 to 2025

Келтірілген суреттер бойынша, Іле Алатауының солтүстік беткейі орталық және шығыс бөліктеріндегі бірнеше мұздықтық-мореналық көлдердің ауданы артып, сел қауіптілігін төндіріп отыр. Қазіргі таңда сел қауіптілігін төндіретін мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуының алдын алу мақсатында жүргізілетін жұмыстардың бірі – алдын-алу шаралары. «Қазселденқорғау» ММ-нің басшылығымен жүргізілетін превентивті жұмыстардың 3 негізгі әдісі бар – сифондар әдісі, эвакуациялық канал қазу арқылы су жіберу және кешенді әдіс. Қазіргі уақытта мұздықтық-мореналық көлдер толысып, ақтарылу қауіптілігі төнген жағдайда қауіптіліктің алдын-алу мақсатында «Қазселденқорғау» ММ ұйымдастырылған превентивті жұмыстар уақытылы жүргізіледі. Сол себептен де мұздықтардың қарқынды еруімен байланысты мореналық көлдердің саны артқанымен, аудандық көрсеткіштерінің тербелісі, уақытылы жүргізілетін превентивті шаралардың нәтижесі.

Превентивті жұмыстар жүргізілген көлдердің бірі Кіші Алматы өзен алабында қалыптасу қарқындылығымен ерекшеленетін №6 мұздықтық-мореналық көлі болып табылады. Кіші Алматы өзен алабының жоғарғы ағысында шоғырланған №6 мұздықтық-мореналық көлі 3580 м биіктікте М. Маметова мұздығының тілінде орналасқан. Зерттеліп отырған мұздықтық-мореналық көл өткен ғасырдың 50 жылдарынан бастап қалыптаса бастап, оның интенсивті толысуы 1970 жылдары байқалған. Көлдің мореналық кешенінің енділігіне және орналасу жеріне байланысты ақтарылу қаупін тудырғандықтан, 1976 жылдары көл қазаншұңқырларында су деңгейін төмендету жұмыстары жүзеге асырылған. 1976-1978 жылдар аралығында жүзеге асырылған превентивті шаралар нәтижесінде көлдегі судың деңгейі 3,4 м-ге төмендетілген. «Қазселденқорғау» ММ-нің барлау жұмыстарының қорытындылары бойынша 1978 жылы көлдің ауданы 4280 м<sup>2</sup> болса, ғарыштық түсірілімді өңдеу бойынша 1990 жылы 11734,7 м<sup>2</sup>, 1999 жылы 20807,4 м<sup>2</sup> құраған. Ал 2013 жылы оның ауданы 22458,6 м<sup>2</sup> өссе, 2021 жылы 11877 м<sup>2</sup>-ге азайып, 2025 жылы қайтадан 16 901 м<sup>2</sup> дейін ұлғаяды (4-сурет, б). Көл ауданының өзгеруі «Қазселденқорғау» ММ жүргізетін превентивті жұмыстарымен түсіндіріледі.

Демек, зерттеу ауданындағы мұздықтармен қоректенетін көлдер негізінен мұздықтардың шегінуіне байланысты дамиды және өседі деп қорытынды жасауға болады. Зерттеліп отырған аудандағы мұздықтық-мореналық көлдердің 97% мұздықтармен қоректенеді, олардың ішінде 13 көл мұздықтармен тікелей байланысты, ал 10 көл мұздықтармен жанама байланыста орналасқан.

Көл өлшемдерінің дәлдігіне әртүрлі кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі, түсірілімдердің алынған күні, оның түсірілу бұрышы, геометриялық және радиометриялық түзетулер және карталау әдістері әсер етеді. Мұздықтық-мореналық көлдерінің ауданын анықтау кезінде орын алған орташа қателік 2,6-13 % құрайды. Қателік периметрге көбейтілген жарты пиксельді қолдану арқылы бағаланғандықтан, кішігірім мұздықтық-мореналық көлдер үшін қателік жоғары болды.



4-сурет – Мұздықтық-мореналық көлдердің уақыттық үлестірілуі (1978-2025 жж. аралығындағы 10-жылдықтар бойынша): а – 13-бис көлі (Үлкен Алматы өзен алабы); ә – №6 көл (Кіші Алматы өзен алабы); б – №8 көл (Талғар өзен алабы); в – №23 көл (Есік өзені алабы)

Figure 4 – Temporal distribution of glacial-moraine lakes (by decades from 1978 to 2025): а – Lake 13-bis (Ulken Almaty River basin); б – Lake No. 6 (Kishi Almaty River basin); в – Lake No. 8 (Talgar River basin); d – Lake No. 23 (Esik River basin).

**Талқылау.** Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық динамикасы зерттелген кезең ішінде айқын өзгерістерге ие болды. Кесте мәліметтері көрсеткендей, 1978-2025 жылдар аралығында көлдердің санының артуымен қатар, олардың аудандарында да бағытталмаған, тербелмелі өзгеріс байқалады. Бұл өзгерістердің негізгі себебі ретінде соңғы онжылдықтардағы мұздықтардың қарқынды еруін атауға болады. Шағын және орта көлемді цирктік мұздықтардың шегінуі оларға жақын орналасқан мұздықтық мореналық көлдердің ауданының ұлғаюына жағдай жасап, жаңа немесе ұлғайған көл қазаншұңқырларының пайда болуына алып келді.

1978-2025 жылдар аралығында Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздықтық-мореналық көлдердің саны мен ауданының өсуі аймақтың қарқынды мұздық деграациясын көрсетеді. Зерттеу нәтижелеріне сәйкес, ең айқын өзгерістер Талғар алабында байқалды. Бұл алап Іле Алатауындағы ең ірі мұздық массивтерімен сипатталады. Мұнда көл аудандарының үш еседен астам ұлғаюы мұздықтардың жедел абляциясы мен мұздан босанған мореналық материалдың көлемінің артуымен байланысты. Бұл үрдіс Солтүстік Тянь-Шаньдағы басқа зерттеулермен де расталады [1, 3, 15, 21].

Керісінше, Кіші Алматы және Есік алаптарында көлдердің ауданы мен саны біршама баяу өзгерген. Бұл алаптардың мұздық ауданы салыстырмалы түрде шағын және біршама оқшауланған цирктік мұздықтармен шектеледі. Соған қарамастан, мұнда да 2013 жылдан кейін көлдердің тұрақты түрде ұлғаюы байқалып, климаттық жылынудың әсері айқындалды. Алайда зерттеу нәтижелері көлдердің өзгерісі тек табиғи климаттық факторлармен шектелмейтінін көрсетеді. Жекелеген көлдердің ауданының азаюы немесе тұрақтануы инженерлік шаралармен байланысты. «Қазселденқорғау» ММ тарапынан сел қауіптілігі жоғары көлдерге жүргізілетін превентивті жұмыстар мұнда маңызды реттеуші рөл атқарады. Атап айтқанда, қазіргі кезде көлдердің шамадан тыс толуы және кенеттен ақтарылуы сифон орнату арқылы су деңгейін төмендету, эвакуациялық каналдар арқылы суды қауіпсіз өтімдермен босату, сондай-ақ кешенді инженерлік тәсілдерді қолдану арқылы реттелуде [10]. Осы шаралардың уақытылы іске асуы көлдердің аудандық мәндерінің табиғи түрде ұлғаю тенденциясын бәсеңдетіп, кей жағдайларда олардың кішіреюіне де ықпал етіп отыр.

Сондықтан мұздықтардың еруімен байланысты көл саны артқанымен, олардың аудандарының бірқалыпты емес динамикасы табиғи процестерге және қауіптің алдын алу шараларының уақытылы жүзеге асырылуына тәуелді. Бұл ерекшелік Іле Алатауы жағдайында көлдердің дамуы тек климаттық тенденцияларға тәуелді емес, сонымен қатар аймақтағы селден қорғау жүйесінің тиімділігімен тікелей байланысты екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері сондай-ақ биіктік белдеулеріне байланысты көлдердің тұрақтылығы мен қауіптілік деңгейі айтарлықтай ерекшеленетінін көрсетті. 3200-3600 м аралығындағы көлдер климаттық өзгерістерге тәуелді екендігі анықталды, ал 3600 м-ден жоғары орналасқан жаңадан пайда болған тұрақсыз көлдер ауданы соңғы жылдары елеулі өзгерістерге ұшырауда, сондықтан олардың нақты өзгерісін бағалауда табиғи процестер мен инженерлік реттеу шараларының әсерін ажырата қарастыру қажет.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық динамикасы климаттық жылыну жағдайында күшейіп келе жатқанын, алайда олардың қауіптілігін басқару аймақта жүргізілетін инженерлік шаралармен тиімді түрде реттелетінін көрсетеді. Сондықтан мұндай көлдер табиғи жағдайдың индикаторы ғана емес, сонымен бірге селден қорғау стратегияларының тиімділігін бағалауға мүмкіндік беретін маңызды объект болып табылады.

**Қорытынды.** Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігіндегі 82 мұздықтық-мореналық көлдің кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін және олардың даму ерекшеліктерін анықтау мақсатында жүргізілді. Зерттеу ауданындағы көлдер 3000-3900 м биіктік белдеуінде шоғырланған және 1978-2025 жылдар аралығындағы кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі орташа және жоғары қашықтықтан зондтау мәліметтері негізінде талданды. Зерттелген кезең ішінде көлдердің саны мен жалпы ауданы барлық алаптарда айтарлықтай өсті. Мысалы, Талғар өзені алабында 1978 жылы 5 көл тіркелсе, 2025 жылы олардың саны 31-ге жетіп, ауданы 64 700 м<sup>2</sup>-ден 256 181 м<sup>2</sup>-ге дейін ұлғайды. Үлкен Алматы өзені алабында көлдер саны 7-ден 26-ға дейін өсіп, ауданы 53 000 м<sup>2</sup>-ден 160 000 м<sup>2</sup>-қа жеткен. Ал Кіші Алматы және Есік алаптарында өсім салыстырмалы түрде баяу болып, Кіші Алматыда 4-тен 5-ке, ауданы 26 600 м<sup>2</sup>-ден 31 688 м<sup>2</sup>-ге, Есік алабында

4-тен 20-ға, ауданы 48 600 м<sup>2</sup>-ден 88 236 м<sup>2</sup>-ге дейін артқан. Бұл көрсеткіштер алаптар бойынша мұздық аудандарының салыстырмалы көлемімен толық сәйкес келеді: Талғар және Үлкен Алматы өзен алаптарында мұздық көлемі үлкен болса, Кіші Алматы мен Есік алаптарындағы мұздық көлемі орташа және шағын болып келеді.

Көлдердің биіктік бойынша таралуы да уақыт ішінде өзгеріске ұшырады. 1978 жылы көпшілік көлдер 3200-3600 м аралығында шоғырланған болса, 2025 жылы 3600-3800 м және одан жоғары биіктіктерде жаңа көлдер пайда болған. Бұл мұздықтардың шегінуі мен мореналық қабаттардың босануына байланысты жаңа көл қазаншұңқырларының пайда болуын көрсетеді. Сонымен қатар, көлдердің саны, ауданы мен биіктік бойынша өзгеруі гидрологиялық, метеорологиялық, геоморфологиялық және геологиялық факторларға тәуелділігін сақтап отыр.

Мұздықтық-мореналық көлдер биік таулы мұздықтық-мореналық кешендегі күрделі химиялық және физикалық процестердің көрінісі болып табылады. Олар қалыптасып, дамып, кейде көл байламдары арқылы ақтарылады немесе деградацияға ұшырайды, нәтижесінде төмен жатқан аудандарда сел қауіптілігі артады. Сондықтан мұздықтық-мореналық көлдерді үздіксіз бақылау мен мониторинг объектісі ретінде қарастыру аса маңызды. Мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы Алматы, Талғар, Есік қалаларына, айтарлықтай қауіп төндіруі мүмкін.

Осыған орай, ММК қалыптасу жағдайларын, олардың уақыт бойынша өзгеруін және даму перспективаларын жүйелі түрде зерттеу қауіпті экзогенді процестердің алдын алу мен сел қауіпін басқару мәселелерінде шешуші рөл атқарады.

Қорытындылай келе, мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуы, олардың даму динамикасы және қарқындылығы климаттың өзгеруі әсерінен мұздықтардың кейін шегінуімен тікелей байланысты екендігі айқын болып отыр. Сонымен қатар, мұздықтар массасының жоғалту темпі соңғы он жылда ұлғайған. Және де мұздықтардың кейін шегінуі әсерінен пайда болатын қауіпті экзогендік процестер климаттың жылынуы салдарынан жиі, әрі апатты болуы мүмкін.

**Қаржыландыру.** Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды. Зерттеу нәтижелері екі ғылыми жоба аясында алынған мәліметтерге негізделеді: Жастарға арналған гранттық қаржыландыру конкурсы аясында орындалатын «Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі мұздықтық-мореналық көлдерінің ақтарылу қауіптілігін бақылау мен бағалауға арналған аймақтық геоақпараттық жүйені әзірлеу» (ЖТН АР27511595) жобасы бойынша Есік және Талғар өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық таралуы талданды, ал бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру бойынша жүзеге асырылатын «Іле және Күнгей Алатауы беткейлері өзен алаптарындағы аса қауіпті мореналық көлдер қауіпін басқарудың кешенді жүйесін әзірлеу» (ЖТН BR28713751) жобасы аясында Кіші Алматы және Үлкен Алматы өзен алаптарындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық өзгерістері зерттелді.

## ӘДЕБИЕТ

- [1] Usmanova Z., Shahgedanova M., Severskiy I., Nosenko G., Kapitsa V. Assessment of glacier area change in the Tekes River Basin, Central Tien Shan, Kazakhstan between 1976 and 2013 using Landsat and KH-9 imagery // *The Cryosphere Discussions*. Preprint. – 2016. – DOI: 10.5194/tc-2016-82
- [2] Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A. J., Akbarov F., Esenaman uulu M., Kalashnikova O., Kapitsa V., Kasatkin N., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Semakova E., Severskiy I., Petrov M., Umirzakov G., Usubaliyev R. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2024. – Vol. 24. – P. 12203-12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024
- [3] Severskiy I., Vilesov E., Armstrong R., Kokarev A., Kogutenko L., Usmanova Z., Morozova V., Raup B. Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol Basin, Central Asia, over recent decades // *Annals of Glaciology*. – 2016. – Vol. 57, No. 71. – P. 382-394. DOI: 10.3189/2016AoS71A575
- [4] Медеуов А., Колотилин Н.Ф., Кремкулов В.А. Сели Казахстана. – Алматы: Ғылым, 1993. – 160 с.
- [5] Виноградов Ю. Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Алматы: Гидрометеоздат, 1997. – 156 с.
- [6] Kinzi H. La glaciación actual y pleistocénica en los Andes Centrales // *Colloquium Geographicum. Geoecología de las regiones montañosas de las Américas Tropicales*. – 1981. – Vol. 9. – P. 1-27.
- [7] Knudsen T. V. Drainage of an ice-dammed lake, Okstindan, Nordland, Norway // *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*. – 1978. – Vol. 32, No. 2. – P. 55-61. DOI: 10.1080/00291957808552026
- [8] Libouty L. Les catastrophes glaciaires // «*La Recherche*». – Mai 1971. – Vol. 2, No. 12. – P. 417-423.
- [9] Медеу А. Р., Благовещенский В. П., Баймолдаев Т. А., Киренская Т. Л., Степанов Б. С. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. – Алматы: Институт географии, 2018. – Т. 2, ч. 2. Основы мониторинга в Иле Алатау. – 288 с.

- [10] Баймолдаев Т., Виноходов В. Н. «Казселезашита» – оперативные меры до и после стихии. – Алматы: Бастау, 2007. – 284 с.
- [11] Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Основы управления. Алматы, 2011. – Т. 1. – 284 с.
- [12] 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.* – 2022. – Vol. 6, No. 456. – P. 147-155. DOI: 10.32014/2518-170X.245
- [13] Raj K. B. G., Remya S. N., Kumar K. V. Remote sensing-based hazard assessment of glacial lakes in Sikkim Himalaya // *Current Science.* – 2013. – P. 359-364. URL: <https://www.jstor.org/stable/24089638>
- [14] Mussina, A. K., Zhanabayeva, Z. A. GIS-technology in the management of mudflow risk // *Journal of Geography and Environmental Management.* – 2016. – Vol. 42, No. 1. URL: <https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/293>
- [15] Zhang M., Chen F., Guo H., Yi L., Zeng J., Li B. Glacial lake area changes in High Mountain Asia during 1990–2020 using satellite remote sensing // *Research (Washington, D.C.).* – 2022. – Article ID 9821275. DOI: 10.34133/2022/9821275
- [16] К.К. Дускаев, А.Г. Чигринец, А.К. Мусина, Ж.А. Жанабаева, С.Т. Ахметова, Е.К. Ермаш. Оценка максимальных расходов воды рек города Алматы // *Гидрометеорология и экология.* – 2019. – № 2. – С. 96-110. URL: <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/770>
- [17] Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z. et al. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // *Water.* – 2020. – Vol. 12, No. 3. – Article 627. <https://doi.org/10.3390/w12030627>
- [18] Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. – Алматы, 2007. – 158 с.
- [19] Медеу А.Р. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. – Алматы: Институт географии, 2009.
- [20] Ауелхан Е. С., Кулбекова Ш. А., Бостаева А. К., Касенов М. К., Заппаров М. Р. Критерии прорывоопасности моренно-ледниковых озер: научно-методологическое обоснование / Ред. А. Баймуканова. – Алматы: Мектеп, 2023. – 181, [2] с.: ил. – ISBN 978-601-07-1657-5.
- [21] Shrestha F., Gao X., Khanal N. R. et al. Decadal glacial lake changes in the Koshi basin, central Himalaya, from 1977 to 2010, derived from Landsat satellite images // *J. Mt. Sci.* – 2017. – Vol. 14. – P. 1969-1984. – <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4230-x>
- [22] McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing.* – 1996. – Vol. 17, No. 7. – P. 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [23] Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia // *Remote Sensing of Environment.* – 2016. – Vol. 175. – P. 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- [24] Muneeb F., Baig S. U., Khan J. A., Khokhar M. F. Inventory and GLOF susceptibility of glacial lakes in Hunza River Basin, Western Karakorum // *Remote Sensing.* – 2021. – Vol. 13, No. 9. – P. 1794. <https://doi.org/10.3390/rs13091794>
- [25] Hanshaw M. N., Bookhagen B. 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 // *The Cryosphere.* – 2014. – Vol. 8. – P. 359-376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- [26] Prakash C., Nagarajan R. Glacial lake inventory and evolution in northwestern Indian Himalaya // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2017. – Vol. 10, No. 12. – P. 5284-5294. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2767098>
- [27] Сағат М. С., Сыдық Н. Қ., Искалиева Г. М., Мерекеев А. А., Амангелді А. А., Абишев Б. Ж. Іле-Алатауының қол жетпейтін аудандарындағы морена көлдерінің жағдайын қашықтықтан зондау деректерін пайдалана отырып бағалау // *Ғылым және білім.* – 2025. – Т. 5, № 3(80). – Б. 295-307. <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2025-3-5-295-307>
- [28] Bolch T., Peters J., Yegorov A., Pradhan B., Buchroithner M., Blagoveshchensky V. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan // *Natural Hazards.* – 2011. – Vol. 59. – P. 1691-1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- [29] Mussina A., Abdullayeva A., Barandun M., Ciccoira A., Tursyngali M. Assessment of the current state and temporal changes of glacial-moraine lakes in the Central and Eastern part of the northern slope of the Ile Alatau, Kazakhstan // *Journal of Water and Land Development.* – 2024. – Vol. 63. – P. 19-24. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- [30] Вилесов Е.Н. Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.) // *Лёд и Снег.* – 2018. – С. 159-170. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170>

## REFERENCES

- [1] Usmanova Z., Shahgedanova M., Severskiy I., Nosenko G., Kapitsa V. Assessment of glacier area change in the Tekes River Basin, Central Tien Shan, Kazakhstan between 1976 and 2013 using Landsat and KH-9 imagery // *The Cryosphere Discussions.* Preprint. 2016. DOI: 10.5194/tc-2016-82.
- [2] Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A. J., Akbarov F., Esenaman uulu M., Kalashnikova O., Kapitsa V., Kasatkin N., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Semakova E., Severskiy I., Petrov M., Umirzakov G., Usabaliev R. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2024. Vol. 24. P. 12203-12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024.
- [3] Severskiy I., Vilesov E., Armstrong R., Kokarev A., Kogutenko L., Usmanova Z., Morozova V., Raup B. Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol Basin, Central Asia, over recent decades // *Annals of Glaciology.* 2016. Vol. 57, No. 71. P. 382-394. DOI: 10.3189/2016AoG71A575.
- [4] Medeuov A., Kolotilin N. F., Kremkulov V. A. Mudflows of Kazakhstan. Almaty: Gylym, 1993. 160 p. (in Russ.).

- [5] Vinogradov Yu. B. Glacial Outburst Floods and Mudflows. Almaty: Gidrometeoizdat, 1997. 156 p. (in Russ.).
- [6] Kinzi H. La glaciación actual y pleistocénica en los Andes Centrales // *Colloquium Geographicum. Geoecología de las regiones montañosas de las Américas Tropicales*. 1981. Vol. 9. P. 1-27.
- [7] Knudsen T. V. Drainage of an ice-dammed lake, Okstindan, Nordland, Norway // *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*. 1978. Vol. 32, No. 2. P. 55-61. DOI: 10.1080/00291957808552026.
- [8] Liboutry L. Les catastrophes glaciaires // «La Recherche», Mai 1971. Vol. 2, No. 12. P. 417-423.
- [9] Medeu A. R., Blagoveshchensky V. P., Baimoldayev T. A., Kirenskaya T. L., Stepanov B. S. Mudflow Phenomena of South-Eastern Kazakhstan. Almaty: Institute of Geography, Part 2. Fundamentals of Monitoring in the Ile Alatau. 2018. Vol. 2, 288 p. (in Russ.).
- [10] Baimoldayev T., Vinokhodov V. N. “Kazselezashchita” – Operational Measures Before and After Natural Hazards. Almaty: Bastau, 2007. 284 p. (in Russ.).
- [11] Medeu A. R. Mudflow Phenomena of South-Eastern Kazakhstan. Fundamentals of Management. Almaty, 2011. Vol. 1. 284 p. (in Russ.).
- [12] 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*. 2022. Vol. 6, No. 456. P. 147-155. DOI: 10.32014/2518-170X.245.
- [13] Raj K. B. G., Remya S. N., Kumar K. V. Remote sensing-based hazard assessment of glacial lakes in Sikkim Himalaya // *Current Science*. 2013. P. 359-364. URL: <https://www.jstor.org/stable/24089638>
- [14] Mussina, A. K., Zhanabayeva, Z. A. GIS-technology in the management of mudflow risk // *Journal of Geography and Environmental Management*. 2016. Vol. 42, No. 1. URL: <https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/293>
- [15] Zhang M., Chen F., Guo H., Yi L., Zeng J., Li B. Glacial lake area changes in High Mountain Asia during 1990–2020 using satellite remote sensing // *Research (Washington, D.C.)*. 2022. Article ID 9821275. DOI: 10.34133/2022/9821275.
- [16] Duskayev K. K., Chigrinets A. G., Mussina A. K., Zhanabaeva Zh. A., Akhmetova S. T., Yermash E. K. Assessment of Maximum Water Discharges of Rivers in Almaty City // *Hydrometeorology and Ecology*. 2019. No. 2. P. 96-110. URL: <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/770> (in Russ.).
- [17] Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z. et al. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // *Water*. 2020. Vol. 12, No. 3. Article 627. <https://doi.org/10.3390/w12030627>
- [18] Yafiazova R. K. The Nature of Mudflows in the Zailiysky Alatau: Adaptation Issues. Almaty, 2007. 158 p. (in Russ.)
- [19] Medeu A. R. Atlas of Natural and Technogenic Hazards and Emergency Risks. Almaty: Institute of Geography, 2009 (in Russ.).
- [20] Auelkhan E. S., Kulbekova Sh. A., Bostaeva A. K., Kasenov M. K., Zapparov M. R. Criteria for the hazard of moraine-glacial lakes: scientific and methodological justification / Ed. A. Baymukanova. Almaty: Mektep, 2023. 181 p. ISBN 978-601-07-1657-5 (in Russ.).
- [21] Shrestha F., Gao X., Khanal N. R. et al. Decadal glacial lake changes in the Koshi basin, central Himalaya, from 1977 to 2010, derived from Landsat satellite images // *J. Mt. Sci.* 2017. Vol. 14. P. 1969-1984. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4230-x>
- [22] McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing* 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [23] Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175. P. 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- [24] Muneeb F., Baig S. U., Khan J. A., Khokhar M. F. Inventory and GLOF susceptibility of glacial lakes in Hunza River Basin, Western Karakorum // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 9. P. 1794. <https://doi.org/10.3390/rs13091794>
- [25] Hanshaw M. N., Bookhagen B. 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 // *The Cryosphere*. 2014. Vol. 8. P. 359-376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- [26] Prakash C., Nagarajan R. Glacial lake inventory and evolution in northwestern Indian Himalaya // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10, No. 12. P. 5284-5294. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2767098>
- [27] Sagat M. S., Sydyk N. K., Iskalieva G. M., Merekeev A. A., Amangeldi A. A., Abishev B. Zh. Assessment of the condition of moraine lakes in remote areas of the Ile-Alatau using remote sensing data // *Science and Education*. 2025. Vol. 5, No. 3(80). P. 295-307. <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2025-3-5-295-307> (in Kaz.).
- [28] Bolch T., Peters J., Yegorov A., Pradhan B., Buchroithner M., Blagoveshchensky V. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 59. P. 1691-1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- [29] Mussina A., Abdullayeva A., Barandun M., Cicoira A., Tursyngali M. Assessment of the current state and temporal changes of glacial-moraine lakes in the Central and Eastern part of the northern slope of the Ile Alatau, Kazakhstan // *Journal of Water and Land Development*. 2024. Vol. 63. P. 19-24. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- [30] Vilesov E.N. Changes In The Size And Condition Of The Glaciers In Kazakhstan For The Last 60 Years (1955–2015). *Ice and Snow*. 2018. Vol. 58(2). P. 159-170 (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170>

А. К. Мусина<sup>1</sup>, Ә. С. Абдуллаева<sup>2</sup>, М. Н. Тұрсынғали<sup>\*3</sup>, Қ. М. Наконова<sup>4</sup>, С. Е. Қайрат<sup>5</sup>

<sup>1</sup> К.г.н., ассоциированный профессор

(КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; *Ainur.Musina@kaznu.edu.kz*)

<sup>2</sup> PhD, и.о. доцента (КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; *Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz*)

<sup>3\*</sup> PhD докторант, преподаватель

(КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; *Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz*)

<sup>4</sup> PhD докторант, младший научный сотрудник (КазНУ им. аль-Фараби,

АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *nakonova\_kymbat3@live.kaznu.kz*)

<sup>5</sup> Магистрант (КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; *kairat\_saule@live.kaznu.kz*)

### АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОРЕННО-ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР В ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ИЛЕ АЛАТАУ

**Аннотация.** Отступление ледников, происходящее на фоне глобального потепления, начавшегося во второй половине XX века, сопровождается дестабилизацией моренных толщ и их частичным таянием, что способствует формированию и активному развитию моренно-ледниковых озер. Возрастающее количество и площадь этих озер в пределах исследуемой территории обусловили необходимость анализа их современного состояния, морфометрических характеристик и интенсивности пространственно-временной динамики. Использование методов дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий обеспечило получение всесторонних и достоверных сведений о параметрах озер, позволило выполнить комплексную интерпретацию спутниковых данных и составить инвентаризационные карты центральной и восточной частей Иле Алатау. Результаты исследования показали, что общее количество моренно-ледниковых озер с 1978 года по настоящее время увеличилось с 20 до 82, а их совокупная площадь возросла на 160%: если в 1978 году она составляла 192 900 м<sup>2</sup>, то к 2025 году достигла 536 452 м<sup>2</sup>. Существенные изменения наблюдаются и в высотном распределении озер: до 2000 года они фиксировались преимущественно в диапазоне 3300-3700 м, к 2013 году эта зона расширилась до 3300-3800 м, к 2021 году – до 3300-3900 м, а в настоящее время (2025 г.) основная концентрация озер отмечается на высотах 3600-3800 м и выше, что отражает активное продвижение зон формирования озер вверх по высотному градиенту в условиях деградации ледников. Увеличение количества и площади моренно-ледниковых озер непосредственно повышает вероятность формирования селевых потоков и создает опасность для территорий, расположенных ниже по течению горных рек. В связи с этим контроль за текущим состоянием озер, оценка их пространственно-временной динамики и своевременное выявление потенциально опасных объектов являются критически важными для прогнозирования и предотвращения опасных экзогенных процессов, а также для разработки эффективных стратегий управления рисками наводнений, связанных с прорывом моренно-ледниковых озер (GLOF).

**Ключевые слова:** моренно-ледниковые озера, данные дистанционного зондирования Земли, пространственно-временные изменения, количество и площади моренно-ледниковых озер, глобальное потепление климата.

A. K. Mussina<sup>1</sup>, A. S. Abdullayeva<sup>2</sup>, M. N. Tursyngali<sup>\*3</sup>, K. M. Nakonova<sup>4</sup>, S. Ye. Kairat<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Candidate of geographical sciences, Associate Professor

(Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; *Ainur.Musina@kaznu.edu.kz*)

<sup>2</sup> PhD, Acting Associate Professor (Al-Farabi Kazakh National University,

Almaty, Kazakhstan; *Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz*)

<sup>3\*</sup> PhD doctoral student, lecturer (Al-Farabi Kazakh National University,

Almaty, Kazakhstan; *Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz*)

<sup>4</sup> PhD doctoral student, junior researcher (Al-Farabi Kazakh National University,

JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *nakonova\_kymbat3@live.kaznu.kz*)

<sup>5</sup> Master's student (Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; *kairat\_saule@live.kaznu.kz*)

### ANALYSIS OF THE SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF GLACIAL-MORAINELAKES IN THE CENTRAL AND EASTERN PARTS OF THE NORTHERN SLOPE OF THE ILE ALATAU

**Abstract.** The retreat of glaciers occurring against the background of global warming that began in the second half of the twentieth century is accompanied by the destabilization and partial melting of moraine deposits, which in turn contributes to the formation and active development of glacial-moraine lakes. The increasing number and total area of these lakes within the study region have necessitated an assessment of their current state, morphometric

characteristics, and the intensity of their spatiotemporal dynamics. The use of remote sensing methods and GIS technologies has enabled the acquisition of comprehensive and reliable information on lake parameters, facilitated the detailed interpretation of satellite data, and allowed for the compilation of inventory maps for the central and eastern parts of the Ile Alatau. The results of the study demonstrate that the total number of glacial-moraine lakes has increased from 20 in 1978 to 82 at present, while their combined area has grown by 160%: if in 1978 it amounted to 192 900 m<sup>2</sup>, by 2025 it had expanded to 536 452 m<sup>2</sup>. Significant changes have also been observed in the altitudinal distribution of the lakes. Until 2000, they were predominantly located within the 3300-3700 m elevation range; by 2013, this zone had expanded to 3300-3800 m; by 2021 – to 3300-3900 m; and at present (2025), the main concentration of lakes is recorded at elevations of 3600-3800 m and higher, reflecting a pronounced upward migration of lake-formation zones along the altitudinal gradient under conditions of accelerated glacier degradation. The increase in the number and area of glacial-moraine lakes directly raises the likelihood of debris-flow formation and poses a threat to the areas situated downstream. Therefore, monitoring the current state of the lakes, assessing their spatiotemporal dynamics, and promptly identifying potentially hazardous sites are critically important for forecasting and preventing dangerous exogenous processes, as well as for developing effective flood-risk management strategies associated with the outburst of glacial-moraine lakes (GLOF).

**Keywords:** glacial-moraine lakes; remote sensing data; spatiotemporal changes; number and area of glacial-moraine lakes; global climate warming.