

А.К. Мусина , М.Н. Тұрсынғали* , Ә.С. Абдуллаева ,
М.С. Оспанова , Ж.У. Бексултанова , Е.Қ. Ермаш 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz

ҮЛКЕН АЛМАТЫ ӨЗЕНІ АЛАБЫНДАҒЫ МҰЗДЫҚТЫҚ-МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕРДІҢ СОҢҒЫ ОНЖЫЛДЫҚТАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН БАҒАЛАУ

Климаттың өзгеруі жағдайында мұздықтық-мореналық көлдердің актарылу қаупі олардың морфометриялық сипаттамаларын жүйелі түрде бақылауды талап етеді. Зерттеу Іле Алатауының солтүстік беткейінде орналасқан Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларының өзгерістерін қашықтықтан зондау мәліметтері мен ГАЖ-технологияларын пайдалану негізінде бағалауға бағытталған. Зерттеудің әдістемелік негізі Copernicus Data Space Ecosystem платформасынан алынған 2015–2025 жж. Sentinel-2 жерсеріктік суреттерін өңдеумен байланысты. Су объектілерін айқындау үшін нормаланған айырымдық су индексі (NDWI), ал морфометриялық параметрлерді есептеу және кеңістіктік талдау үшін ArcGIS Pro бағдарламасының мүмкіндіктері пайдаланылды. Әрбір көл үшін су объектілерінің өлшемін, пішінін және динамикасын сипаттайтын 12 морфометриялық көрсеткіш анықталды. Алынған нәтижелер зерттеу кезеңінде мұздықтық-мореналық көлдер өзгерістерінің түрлі бағытта жүргенін көрсетті. 2015–2025 ж. аралығында жекелеген мұздықтық-мореналық көлдердің ауданы шамамен 0.90–9.60 мың м²-ге ұлғайса, бірқатар көлдерде оның 3.00–31.3 мың м²-ге дейін азайғаны анықталды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін сандық бағалау үшін жерсеріктік суреттер мен ГАЖ-талдауды кешенді пайдаланумен сипатталады. Алынған нәтижелер мұздықтық-мореналық көлдердің мониторингтік мәліметтерін өзектендіру және ықтимал сел қаупін бағалауды ақпараттық қамтамасыз ету үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: мұздықтық-мореналық көлдер, ГАЖ-талдау, морфометриялық сипаттамалар, қашықтықтан зондау, сел қаупі, сел қауіптілігі.

A.K. Mussina, M.N. Tursyngali*, A.S. Abdullayeva,
M.S. Ospanova, Zh.U. Beksultanova, Y.K. Yermash

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz

Assessment of changes in glacial-moraine lakes in the Ulken Almaty river basin over the last decade

Under conditions of climate warming, the increasing risk of glacial-moraine lake outburst necessitates systematic monitoring of their morphometric characteristics. This study aims to assess changes in the morphometric characteristics of glacial-moraine lakes in the Ulken Almaty River basin, located on the northern slope of the Ile Alatau, using remote sensing data and GIS technologies. The methodological basis of the study involves the processing of Sentinel-2 satellite imagery for 2015–2025, obtained from the Copernicus Data Space Ecosystem. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied to delineate water bodies, while ArcGIS Pro was used to calculate and spatially analyze morphometric parameters. For each lake, a set of 12 morphometric indicators characterizing the size, shape, and dynamics of the water bodies was determined. The results revealed a multidirectional pattern of changes in the glacial-moraine lakes during the study period. Between 2015 and 2025, the area of individual lakes increased by approximately 0.90–9.60 thousand m², whereas a decrease of 3.00–31.3 thousand m² was observed for several other lakes. The scientific novelty of the study lies in the integrated use of a multi-year series of satellite data and GIS analysis for the quantitative assessment of the spatiotemporal variability of glacial-moraine lakes in the Ulken Almaty River basin. The obtained results can be used to update the monitoring of glacial-moraine lakes and to provide information support for assessing potential mudflow hazards.

Keywords: glacial-moraine lakes, GIS analysis, morphometric characteristics, remote sensing, mudflow risk, mudflow hazard.

А.К. Мусина, М.Н. Тұрсынғали*, Ә.С. Абдуллаева,
М.С. Оспанова, Ж.У. Бексұлтанова, Е.Қ. Ермаш

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz

Оценка изменений моренно-ледниковых озёр в бассейне реки Улькен Алматы за последнее десятилетие

В условиях потепления климата увеличение опасности прорыва моренно-ледниковых озёр обуславливает необходимость систематического мониторинга их морфометрических характеристик. Исследование направлено на оценку изменений морфометрических характеристик моренно-ледниковых озёр бассейна реки Улькен Алматы, расположенного на северном склоне Иле Алатау, с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий. Методологическая основа исследования связана с обработкой спутниковых снимков Sentinel-2 за 2015–2025 гг., полученных с платформы Copernicus Data Space Ecosystem. Для выделения водных объектов применялся нормализованный разностный водный индекс NDWI, а расчет и пространственный анализ морфометрических параметров выполнялись в ArcGIS Pro. Для каждого озера определен комплекс из 12 морфометрических показателей, характеризующих размеры, форму и динамику водных объектов. Полученные результаты показали разнонаправленный характер изменений моренно-ледниковых озёр в течение исследуемого периода. В период 2015–2025 гг. площадь отдельных моренно-ледниковых озёр увеличилась примерно на 0.90–9.60 тыс. м², тогда как для ряда объектов отмечено ее сокращение на 3.00–31.3 тыс. м². Научная новизна работы заключается в комплексном использовании ряда спутниковых данных и ГИС-анализа для количественной оценки пространственно-временной изменчивости моренно-ледниковых озёр бассейна Улькен Алматы. Полученные результаты могут быть использованы для актуализации мониторинга моренно-ледниковых озёр и информационного обеспечения оценки потенциальной селевой опасности.

Ключевые слова: моренно-ледниковые озера, ГИС-анализ, морфометрические характеристики, дистанционное зондирование, селевой риск, селевая опасность.

Кіріспе

Климаттың ғаламдық жылынуы жағдайында биік таулы аймақтардағы мұздықтық-мореналық көлдердің қарқынды динамикасы және ақтарылу қаупінің артуы су ресурстарын басқару мен табиғи апаттардың алдын алу мәселелерінде айрықша өзектілікке ие болып отыр. Мұздықтық-мореналық көлдердің қауіп ошағына айналуының басты себебі ретінде мұздықтардың кейін шегінуі (Chen et al., 2024; Medeu et al., 2022; Song et al., 2025) мен көл байламдарының бұзылуынан туындайтын гляциалды сел тасқындарын айтуға болады. Осыған орай, мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын – ауданын, периметрін, қазаншұңқырының пішінін, көлемін анықтау апатты гидрологиялық құбылыстардың қаупін бағалау мен мониторинг жүйелерін дамыту үшін маңызды.

Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриясын анықтау отандық ғылымда XX ғасырдың ортасынан бері зерттеліп келеді. Мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын жүйелеу мен классификациялауға В.А. Керемкулов маңызды үлес қосқан (Керемкулов, 1985). Т.Л. Киренскаямен бірлескен жұмыста мореналық көлдердің ақтарылуын болжаудың әдіс-

темелік негіздері жасалып, морфометриялық көрсеткіштер болжамдық параметрлер ретінде қарастырылды (Керемкулов және Киренская, 1985). Кеңестік кезеңнің өзінде-ақ Солтүстік Тянь-Шаньдағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуынан қалыптасатын гляциалды селдерді зерттеудің негізі қаланды. Бұл зерттеулердің басым бөлігі мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуынан алдын ала қорғану әдістерін негіздеу мен олардың қалыптасу механизмдерін жүйелеумен байланысты болды (Попов, 1987). Аталған кезеңде жүргізілген зерттеулердің ситуациялық және объектілік талдауы (Попов және т.б., 2025) мұздықтық-мореналық көлдердің XX ғ. екінші жартысынан бастап әлі күнге дейін маңыздылығын жоғалтпағанын көрсетеді. Аймақтық деңгейде жүргізілген зерттеулер (Bolch, 2007; Bolch et al., 2011) ғарыштық суреттер, NDWI индексі мен морфометриялық талдауды интегралды түрде қолдана отырып, мұздықтық-мореналық көлдерді картографиялап қана қоймай, оларды қауіптілік дәрежесі бойынша жіктеуге болатынын дәлелдеді (Karitsa et al., 2023). Солтүстік Тянь-Шаньдағы 57 мұздықтық көлде 2009-2020 жж. аралығында жүргізілген 74 батиметриялық түсірілім мәліметтерінің негізінде үш өлшемді параметрлер есептеліп,

ауданы, тереңдігі мен көлемі арасындағы эмпирикалық тәуелділіктер орнатылды. Өлемдік деңгейде Sentinel-1 және Sentinel-2 мәліметтері мен Random Forest алгоритмін қолдану арқылы мұздықтық көлдерді автоматты түрде анықтау және картографиялау мүмкіндіктері бағаланса (Wangchuk & Bolch, 2020), оптикалық және SAR деректерін біріктіретін U-Net негізіндегі терең оқыту тәсілдері де қолданылды (Wu et al., 2020). Кейінгі зерттеулерде Sentinel-1, Sentinel-2 және басқа да кеңістіктік деректерді терең конволюциялық нейрондық желілермен біріктіру арқылы автоматтандырылған картографиялау әдістері жетілдірілді (Kaushik et al., 2022). Сонымен қатар, Sentinel-2 суреттері негізінде жетілдірілген YOLOv5-Seg моделін қолдану Азияның биік таулы аумағындағы мұздықтық көлдерді автоматты түрде анықтау мен олардың шегараларын белгілеуде жоғары нәтижелер көрсетті (Yin et al., 2024).

Қазақстандық тәжірибеде мұздықтық-мореналық көлдерді ЖҚЗ мәліметтері негізінде бақылаудың интеграцияланған ақпараттық жүйелері құрылып (Институт ионосферы, 2025; Сыдық және т.б., 2025; Mussina et al., 2023; Shahgedanova et al., 2024), көлдердің кеңістіктік үлестірілуі мен атрибуттық мәліметтері анықталып, Іле мен Күнгей Алатау жоталарының мұздықтық-мореналық көлдерінің мониторингіне арналған Moraine Lake Іle Alatau (<https://morainelakes.kz/#/>) WEB-GIS порталында қолжетімді етілді. Бұл ақпараттық ресурстар мен мәліметтер базасында жылдар таңдалып, сол жылдар үшін түрлі кеңістікті кескіндеу мүмкіндігіне ие (Landsat 30 м, Sentinel 10 м, PlanetScope 3-5 м) ғарыштық суреттер негізінде мұздықтық мореналық көлдер идентификацияланған. Ал ұсынылып отырған жұмыста кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі 10 м тең Sentinel-2 жерсеріктік суреттері негізінде 2015-2025 жж. аралығында Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық мореналық көлдер айқындалып, олардың орналасуы, саны, ауданы, көлемі, орташа ені, жаға сызығы ұзындығы, жаға сызығының дамуы, орташа тереңдігі, созыңқылық көрсеткіші, жинақылық көрсеткіші соңғы онжылдық үшін талданды.

Зерттеу объектісі ретінде Іле Алатауының солтүстік беткейінде орналасқан Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің (1-сурет) таңдалуы аймақтың табиғи-географиялық ерекшеліктерімен, климаттың ғаламдық жылынуымен байланысты. Алаптың биік таулы бөлігінде қазіргі мұздану аймағы,

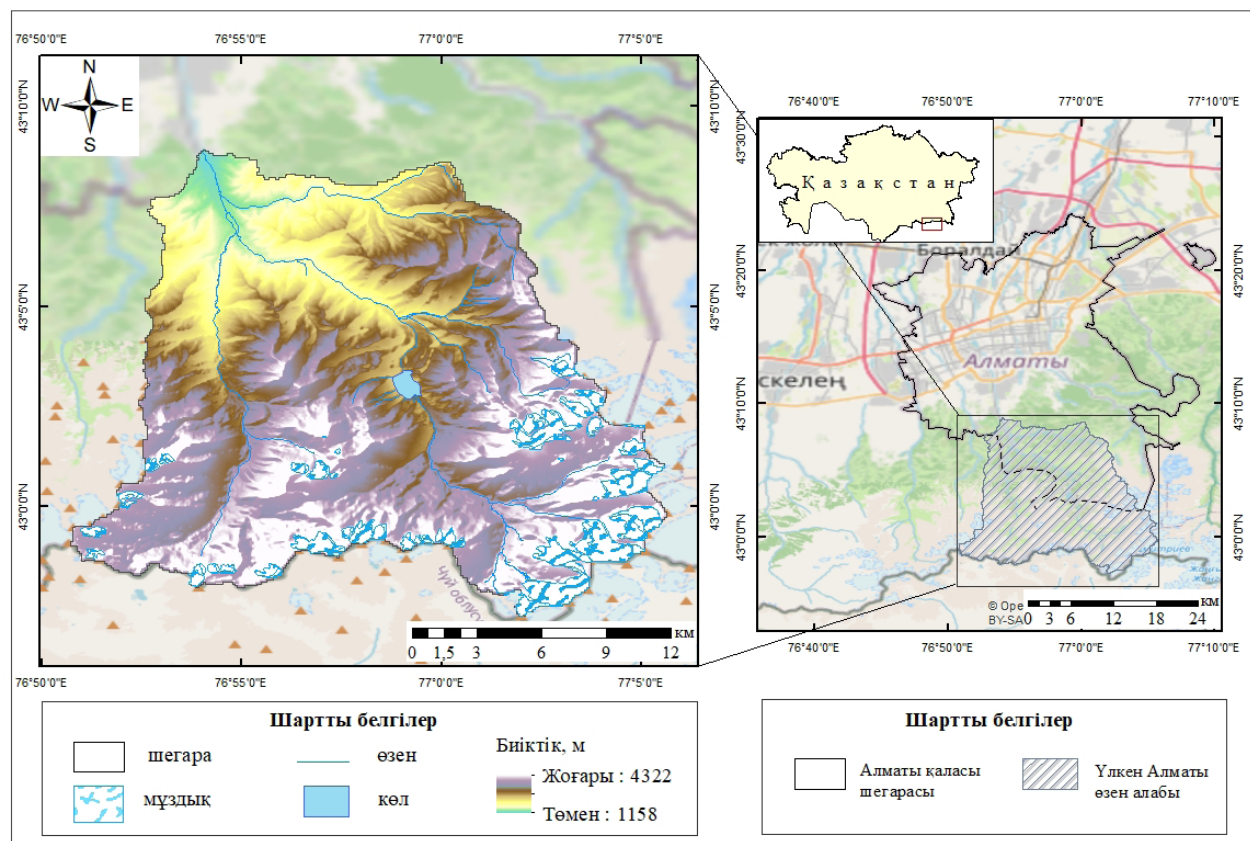
мұздықтық-мореналық кешендер және мұздықтардың шегінуі нәтижесінде қалыптасқан көлдер кең таралған. Климаттық жағдайлардың өзгеруі мен мұздықтардың кейін шегінуі мұздықтық-мореналық көлдердің қалыптасуына және дамуына әсер ететіндіктен көлдердің саны мен морфометриялық сипаттамалары уақыт бойынша айтарлықтай өзгерістерге ұшырауы мүмкін. Сонымен қатар, апатты сел тасқындарын қалыптастыратын мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылуы аталған аумақты тұрақты мониторингтеудің қажеттілігін арттырады. Сондықтан Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің соңғы онжылдықтағы морфометриялық өзгерістерін бағалау 11, 13, 15 тұрақты даму мақсаттарына сәйкес алаптағы қауіпсіздікті қамтамасыз етіп, сел тасқындарының зиянды салдарын төмендетуге, алдын алуға және болдырмауға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты ГАЖ-талдауды қолдана отырып, Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің негізгі морфометриялық сипаттамаларын анықтау және олардың кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін бағалаумен байланысты. Ол үшін (1) NDWI индексі пайдалана отырып, 2015-2025 жж. аралығындағы Sentinel-2 жерсеріктік суреттері бойынша көлдердің сұлбалары алынды; (2) ArcGIS Pro бағдарламалық ортасында морфометриялық параметрлер анықталды; (3) морфометриялық көрсеткіштер динамикасын талдау негізінде көл қазаншұңқырларының даму қарқындылығы бағаланды; (4) қашықтықтан мониторингтеу үшін ГАЖ мүмкіндіктерінің тиімділігі негізделді.

2015-2025 жж. аралығында ГАЖ арқылы Үлкен Алматы өзені алабының әртүрлі кезеңдерде түсірілген жерсеріктік суреттері өңделіп, мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық көрсеткіштері сандық тұрғыдан талданған. Бұл зерттеу мұздықтық-мореналық көлдердің қазаншұңқырларының уақыт және кеңістік бойынша өзгеру заңдылықтарын айқындауға мүмкіндік береді. Морфометриялық сипаттамалар су объектілерінің режимін бағалауға, ықтимал өзгерістерін болжауға және су ресурстарын тиімді басқару шараларын әзірлеуге, инженерлік құрылыстарды орналастыру орындарын анықтауға негіз болады. Қол жеткізілген нәтижелер зерттеліп отырған аудандағы мұздықтық-мореналық көлдердің ақтарылу қаупін уақтылы бағалауға, сонымен қатар сел тасқындарының алдын алуға және олардың зиянды салдарын азайтуға тікелей ықпал етеді.

1-сурет

Үлкен Алматы өзен алабы



Ескерту: авторлар құрастырған

Зерттеу материалдары мен әдістері

ЖҚЗ мәліметтері мен ГАЖ технологиялары мұздық-мореналық көл қазаншұңқырларының ауданы мен жағалық сызық динамикасын бағалауда маңызды рөл атқарады. Заманауи қашықтықтан зондтау мәліметтері көлдердің морфометриялық өзгерістерін айтарлықтай дәл анықтауға мүмкіндік береді. Алайда қашықтықтан зондтау мәліметтері негізінде алынған нәтижелер бұрынғы топографиялық карталарда немесе далалық бақылау материалдарында келтірілген мәліметтерден едәуір айырмашылық көрсеткен болса, бұл айырмашылықтар картографиялық материалдардың дайындалған мерзімімен, сол кезеңдегі ЖҚЗ және ГАЖ технологияларының шектеулі дамуымен немесе олардың қолданылмауымен байланысты болуы мүмкін. Сондықтан мұндай жағдайларда қолданыстағы топография-

лық, соның ішінде сандық картографиялық материалдарды қайта қарау, нақтылау және қажет болған жағдайда жаңарту қажеттілігі туындайды.

Үлкен Алматы өзен алабындағы мұздық-мореналық көлдердің соңғы онжылдықтағы (2015-2025 жж.) өзгерістерін бағалау үшін барлығы 13 ғарыштық түсірілімдер өңдеуден өткізілді. Өңдеу барысында Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE) (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) базасынан алынған Sentinel-2 ғарыштық суреттері бойынша соңғы онжылдық үшін 19.08.2015, 09.08.2016, 09.08.2017, 14.08.2018, 19.08.2019, 23.08.2020, 18.08.2021, 23.08.2022, 30.08.2023, 27.08.2024, 07.08.2025, 27.08.2025, 01.09.2025 күндерінде түсірілген ғарыштық суреттер дешифрленді. Дешифрлеу нәтижелері бойынша бұлттан арылған (5%-дан төмен) және қар мен мұз қабаттарының минималды шегі байқалатын және түсірілімнің

жоғары сапасымен ерекшеленген ғарыштық түсірілімдер таңдалып алынды. Ғарыштық түсірілімдердің жарияланған уақыты мен идентификаторлары 1-кестеде келтірілген.

Қазіргі уақытта су объектілерін анықтау және олардың морфометриялық сипаттамала-

рын нақтылау үшін мультиспектрлік суреттер және NDWI индексі пайдаланылады. Ғарыштық суреттер қатары зерттеу ауданының жай-күйі және зерттеу объектілерінің морфометриялық сипаттамалары туралы сенімді ақпаратқа қол жеткізуге мүмкіндік береді.

1-кесте

Мұздық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын анықтауда қолданылған мәлімет көздері

Ғарыштық жерсерік	Түсірілімнің жарияланған уақыты	Ғарыштық суреттің идентификаторы	Мәліметтер көзі	Кеңістікті кескіндеу мүмкіндігі, м
Sentinel-2	11.04.2016	S2A_MSIL1C_20150819T063527_N0214_R076_T43TFH_20160411T112938.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	01.10.2023	S2A_MSIL1C_20160809T054642_0500_048_43TH_20231001T044838.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	01.10.2023	S2B_MSIL2A_20170809T054639_N0500_R048_T43TFH_20231001T130944.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	12.08.2023	S2A_MSIL1C_20180814T054629_N0500_R048_T43TFH_20230812T090425.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	19.08.2019	S2A_MSIL1C_20190819T061731_N0208_R034_T43TFH_20190819T093452.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	23.08.2020	S2A_MSIL1C_20200823T055641_N0209_R091_T43TFH_20200823T084317.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	18.08.2021	S2A_MSIL1C_20210818T052743_N0301_R062_T43TFH_20210818T091526.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	04.07.2024	S2A_MSIL1C_20220823T054639_N0510_R048_T43TFH_20240704T100842.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	30.08.2023	S2A_MSIL1C_20230830T060842_N0512_R047_T43TFH_20230830T094315.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	27.08.2024	S2A_MSIL1C_20240827T053918_N0511_R073_T43TFH_20240827T092647.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	07.08.2025	S2A_MSIL1C_20250807T054827_N0513_R056_T43TFH_20250807T101936.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	27.08.2025	S2B_MSIL2A_20250827T054639_N0511_R048_T43TFH_20250827T074851.SAFE	CDSE	10 м
Sentinel-2	01.09.2025	S2C_MSIL2A_20250901T054651_N0511_R048_T43TFH_20250901T100216.SAFE	CDSE	10 м

Ескерту: авторлар құрастырған

Мұздық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамаларын зерттеу мультиспектралды мәліметтерді біріктіру, су бетін айқындаушы индексті пайдалану арқылы ЖҚЗ мәліметтерінің негізінде жүзеге асырылады. NDWI су беттерінің спектрлік ерекшеліктерін күшейтіп, оларды қоршаған жер жамылғысынан ажыратуға мүмкіндік береді. Sentinel-2 (10 м) суреттерінің көлдерді айқындаудағы ең төменгі картографиялау бірлігі (minimum mapping unit,

MMU) 500 м², яғни төрт пиксель мөлшерінде қабылданды. Сондықтан NDWI нәтижелерін векторлау барысында ауданы ≥ 500 м² полигондар көл айдыны ретінде сақталып, 500 м²-ден кіші полигондар ықтимал жіктеу қателері мен ұсақ спектрлік шулардың әсерін азайту мақсатында кейінгі талдаудан алынып тасталды (Leigh et al., 2019; Lesi 2022 et al.). Қашықтықтан зондтау мәліметтері арқылы мұздық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары-

ның уақыттық өзгерістерін талдауға да болады (Emmer et al., 2016; Muneeb et al., 2021; Mussina et. al., 2024; Мусина және т.б., 2025; Prakash & Nagarajan, 2017).

Зерттеуде қар қорының минималды мөлшері байқалатын, салыстырмалы түрде құрғақ маусым болып табылатын және мұздықтық-мореналық көлдердің су беті толықтай қар мен мұздан арылатын тамыз-қыркүйек айларындағы жерсеріктік түсірілімдер алынды.

Түрлі лимнологиялық және гидробиологиялық зерттеулерді жүргізу үшін морфометриялық сипаттамалар аса маңызды көрсеткіш болып табылады. Көлдердің негізгі морфометриялық сипаттамалары және оларды анықтау әдістері Г.Ю. Верещагиннің (1930) зерттеулерінде келтірілген, солардың ішінде, лимнологиялық және гидробиологиялық зерттеулерде 10-нан 30-ға жуық сипаттамалар кеңінен қолданылған. Сол себепті, мұздықтық-мореналық көлдердің конфигурациясын сипаттау мақсатында зерттеу барысында лимнологияда кеңінен қолданылатын морфометриялық сипаттамалардың мәндері анықталды (Григорьев, 1959). 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 ($K_{жаға}$). Көлдің ауданы су қоймасының жағалау сызығымен шектелген аумақты ғарыштық суретте дешифрлеу негізінде айқындалады. Көлдердің ауданы туралы мәліметтер пайдаланылатын суреттердің кеңістіктік кескінделу мүмкіндігіне сәйкес дәлдікпен беріледі (Håkanson, 1981; Государственный гидрологический институт, 2017). ГАЖ ортасында көлдердің морфометриялық сипаттамаларын анықтаудың арнайы құралдары бар. Сондай-ақ, көлдің морфометриялық сипаттамаларының автоматтандырылған есептік нәтижелеріне қол жеткізіп, олардың визуализациялануын карта түрінде ұсынуға заманауи статистикалық бағдарламалардың (R бағдарламалау тілі) арнайы модулі (LakeMorpho) мүмкіндік береді (Hollister & Stachelek, 2017). Айтарлықтай дәл нәтиже алу үшін талап етілетін өлшем бірліктерін орнату және сандық картаны проекциялық координаталар жүйесіне аудару қажет.

Талданып отырған морфометриялық сипаттамалар ішінде көлдердің ауданы (A , m^2), жаға сызығының ұзындығы (K , m), ұзындығы (L , m) мен ені (B , m) ғарыштық суреттерді өңдеу арқы-

лы ArcGIS Pro бағдарламасындағы ArcToolbox модуліндегі «Minimum Bounding Geometry», «Calculate Geometry Attributes» функциялары арқылы анықталды. Ал, көлдің орташа ені ($B_{орт}$, m) көл айдыны ауданының ұзындығына қатынасы ($B_{орт} = A/L$, m) негізінде, жаға сызығының дамуы $K_i = 0.28(K/\sqrt{A})$ негізінде, орташа тереңдігі (D , m) көл көлемінің көл бетінің ауданына қатынасы ($D = V/A$) негізінде, жаға сызығы дамуының көрсеткіші жаға сызығы ұзындығының көл бетінің ауданына қатынасы ($K_{жаға} = K/A$), созыңқылық көрсеткіші көл ұзындығының көлдің орташа еніне қатынасы ($K_{созың} = L/B_{орт}$), жинақылық көрсеткіші орташа енінің максималды еніне қатынасы ($K_{комп} = B_{орт}/B$) негізінде анықталды.

Көлдердің көлемін (V , m^3) бағалау үшін су беті ауданына (A , m^2) негізделген екі эмпирикалық тәуелділік – Попов (1991) және Huggel et al. (2002) формулалары қолданылды. Н.В. Попов бойынша көл көлемі келесі тәуелділікпен анықталды:

$$V = 0.059 \times A^{1.44} \quad (1)$$

ал Хюгель ұсынған эмпирикалық тәуелділік бойынша көл көлемі:

$$V = 0.104 \times A^{1.42} \quad (2)$$

мұндағы V – көлдің есептік көлемі, m^3 ; A – көлдің су беті ауданы, m^2 .

Көлдің орналасу биіктігі ($H_{орт}$, m) – көл айдыны орналасқан жер бедерінің теңіз деңгейінен есептелген орташа абсолюттік биіктігін сипаттайтын көрсеткіш. Көл айдынының орналасқан орташа абсолюттік биіктігін анықтау үшін кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі 12.5 м құрайтын Alos Palsar (<https://search.asf.alaska.edu>) жер бедерінің сандық моделі (ЖБСМ) мәліметтері қолданылды.

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

Нәтижелер мен талқылау

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық сипаттамалары ЖҚЗ және ЖБСМ мәліметтері негізінде есептеліп, олардың 2015-2025 жж. аралығындағы кеңістіктік және уақыттық өзгерісте-

рі талданды. Морфометриялық көрсеткіштерді анықтау кезінде су объектілерін ГАЗ және жерсеріктік суреттер бойынша сипаттаудың дүниежүзілік және посткеңестік қағидалары ескерілді (Håkanson, 1981; Государственный гидрологический институт, 2017; Kapitsa et al., 2023).

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдер саны 2015-2025 жж. ЖҚЗ мәліметтері бойынша 10-19 аралығында өзгерді. Зерттеу кезеңіндегі өзгерістер бір бағытта жүрмей, жылдар бойынша ауытқып отырды, атап айтқанда, 2015 жылы көлдердің ең аз саны (10) байқалды, ал ең жоғары саны 2022 жылы 19 жетті. 2016, 2018, 2020, 2021 және 2024 жылдары көлдер саны 18 құрады, ал жекелеген жылдары

(2017, 2019, 2023) қайта төмендеу байқалған. Көлдердің жалпы саны салыстырмалы тұрақты болғанымен, олардың аудандық өлшемдеріне байланысты саны жоғары құбылмалылыққа ие болды. Соңғы жылдардағы қолжетімді әрі ашық ресурстағы Sentinel-2 суреттері негізінде 2025 жыл үшін 17 көл анықталды. Олардың «Қазселденқорғау» ММ Паспортына сәйкестендірілген атаулары мен орны жайлы мәліметтер 2-кестеде келтірілген. Мұздықтық-мореналық көлдердің көпжылдық өзгерістерін бағалауда маусымдық қар жамылғысы азайып, көл акваториясы бұлттар мен олардың көлеңкелерімен жабылмаған тамыз-қыркүйек айларындағы сапалы суреттерге басымдық берілді.

2-кесте

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдер жайлы жалпы мәліметтер (2025 ж.)

№	Паспорт* бойынша атауы	Географиялық координата		Теңіз деңгейінен биіктігі, м	Мәлімет көзі
		ендік	бойлық		
1	№1 БИС	43° 1' 16.230» N	76° 56' 50.194» E	3464	S2C, 10 м, 2025/09/01
2	№4	42° 59' 23.134» N	76° 51' 13.997» E	3859	S2C, 10 м, 2025/09/01
3	№4А (қосымша анықталған)	42° 59' 19.256» N	76° 51' 24.707» E	3868	S2C, 10 м, 2025/09/01
4	№7	43° 1' 42.247» N	77° 3' 9.210» E	3823	S2A, 10 м, 2025/08/07
5	№8	42° 59' 22.672» N	77° 3' 41.930» E	3642	S2A, 10 м, 2025/08/07
6	№8А (қосымша анықталған)	42° 59' 26.721» N	77° 3' 47.112» E	3620	S2A, 10 м, 2025/08/07
7	№9	42° 59' 41.050» N	77° 3' 37.228» E	3541	S2A, 10 м, 2025/08/07
8	№10	42° 59' 44.555» N	77° 4' 2.995» E	3595	S2A, 10 м, 2025/08/07
9	№11	43° 0' 39.791» N	77° 3' 53.632» E	3548	S2A, 10 м, 2025/08/07
10	№12	43° 0' 49.932» N	77° 4' 19.220» E	3625	S2A, 10 м, 2025/08/07
11	№13	43° 2' 29.583» N	77° 2' 14.411» E	3416	S2A, 10 м, 2025/08/07
12	№13 БИС	43° 2' 21.936» N	77° 2' 38.651» E	3513	S2A, 10 м, 2025/08/07
13	№13А (қосымша анықталған)	43° 2' 29.376» N	77° 2' 8.608» E	3414	S2A, 10 м, 2025/08/07
14	№15А (қосымша анықталған)	43° 2' 42.359» N	77° 3' 2.745» E	3568	S2A, 10 м, 2025/08/07
15	№16	43° 2' 51.781» N	77° 3' 23.801» E	3696	S2A, 10 м, 2025/08/07
16	№17 (қосымша анықталған)	42° 58' 32.702» N	76° 54' 45.789» E	3610	S2B, 10 м, 2025/08/27
17	№18 (қосымша анықталған)	42° 59' 10.809» N	76° 55' 19.159» E	3407	S2C, 10 м, 2025/09/01

Ескерту: авторлар құрастырған

Ескерту: «Қазселденқорғау» ММ-нің 2024 жылғы «Үлкен Алматы өзені алабындағы мореналық көлдердің Паспорты»

2025 жылғы ЖҚЗ мәліметтерін «Қазселденқорғау» ММ-нің 2024 жылғы «Үлкен Алматы өзені алабындағы мореналық көлдердің Паспортымен» салыстыру нәтижесінде 17 көлдің 11-і ресми паспорттық есепте бар объектілерге сәйкес келетіні, ал №4А, №8А, №13А, №15А, №17 және №18 көлдердің паспорттық тізімде

көрсетілмегені анықталды (2-кесте). Салыстыру кезінде орын алған айырмашылықтар таңдалған жерсеріктік суреттердің датасымен, өңдеу тәсілдерімен, көлдерді идентификациялау индекстерімен, индекстерді айқындаудағы шектік мәндердің орнатылуымен түсіндіріледі. Ретроспективті ЖҚЗ талдауы аталған объектілерінің

бірқатарының 2025 жылға дейінгі суреттерде де болғанын көрсетті, сондықтан «қосымша анықталған» белгісі олардың алғаш рет 2025 жылы пайда болғанын емес, ресми паспорттық тізіммен салыстырғанда қосымша айқындалғанын білдіреді. Паспорттық тізімге енгізілмеген алты объект 2025 жылы анықталған көлдердің шамамен 35%-ын құрайды. Бұл нәтиже мұздықтық-мореналық көлдердің тізімін ЖҚЗ мәліметтері арқылы жүйелі нақтылап, ресми инвентаризациялық мәліметтерді уақытылы жаңарту қажеттігін көрсетеді.

2015-2025 жылдары кемінде бір рет анықталған 19 бірегей көлдің көпжылдық орташа су беті аудандары бойынша Python бағдарламалау ортасында табиғи топтастыру (Natural Breaks) әдісі қолданылды. Бұл әдіс сипаттық мәндер қа-

тарындағы ішкі топтық айырмашылықтарды кемітіп, топтар арасындағы айырмашылықтарды айқындауға мүмкіндік береді (Chen et al., 2013).

Көпжылдық орташа аудан мәндерінің таралуында 3 мың және 10 мың м² деңгейлерінде негізгі шектік мәндер бөлінді. Осы шектер бойынша 19 көл үш аудандық класқа жіктелді:

- ұсақ – су айдынының ауданы 3 мың м²-ге дейін;

- орташа – су айдынының ауданы 3-10 мың м²;

- ірі – су айдынының ауданы 10 мың м²-ден жоғары.

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің аталған топтар бойынша 2015–2025 ж. аудандық сипаттамаларының өзгерісі 3-кестеде көрсетілген.

3-кесте

Үлкен Алматы өзені алабы бойынша мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. аралығындағы аудандық сипаттамалары

Жыл	Класс бойынша ауданы, мың м ²	Ауданы бойынша көлдер саны	Көлдердің жиынтық ауданы, мың м ²	Жалпы ауданынан үлесі, %
2015	ірі (>10)	4	87.9	75.7
	орташа (3-10)	4	22.4	19.3
	ұсақ (≤3)	2	5.71	4.92
2016	ірі (>10)	5	114	72.4
	орташа (3-10)	4	26.9	17.1
	ұсақ (≤3)	9	16.5	10.5
2017	ірі (>10)	6	108	85.4
	орташа (3-10)	2	8.07	6.40
	ұсақ (≤3)	4	10.4	8.23
2018	ірі (>10)	6	104	76.7
	орташа (3-10)	4	15.8	11.6
	ұсақ (≤3)	8	16.0	11.7
2019	ірі (>10)	2	58.0	51.0
	орташа (3-10)	7	43.8	38.5
	ұсақ (≤3)	7	12.0	10.5
2020	ірі (>10)	5	93.8	71.8
	орташа (3-10)	5	24.5	18.7
	ұсақ (≤3)	8	12.4	9.48
2021	ірі (>10)	5	98.3	67.3
	орташа (3-10)	6	34.7	23.7
	ұсақ (≤3)	7	13.1	8.95
2022	ірі (>10)	5	117	71.4
	орташа (3-10)	6	34.0	20.7
	ұсақ (≤3)	8	13.0	7.90

Кестенің жалғасы

Жыл	Класс бойынша ауданы, мың м ²	Ауданы бойынша көлдер саны	Көлдердің жиынтық ауданы, мың м ²	Жалпы ауданынан үлесі, %
2023	ірі (>10)	1	57.3	50.2
	орташа (3-10)	7	46.4	40.7
	ұсақ (≤3)	8	10.3	9.05
2024	ірі (>10)	5	121	73.1
	орташа (3-10)	7	32.5	19.6
	ұсақ (≤3)	6	12.1	7.29
2025	ірі (>10)	4	69.9	62.3
	орташа (3-10)	7	34.3	30.6
	ұсақ (≤3)	6	8.00	7.13

Ескерту: авторлар құрастырған

Осы топтау нәтижесінде Үлкен Алматы өзені алабындағы ірі көлдер 1-6, орташа көлдер 2-7 және ұсақ көлдер 2-9 аралығын құрады. Аталған

19 бірегей көлдің 2015–2025 ж. 12 морфометриялық көрсеткішінің өзгерісі мен олардың орташа мәндері 4-кестеге жинақталды.

4-кесте

Үлкен Алматы өзені алабы бойынша мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. аралығындағы нақтыланған морфометриялық сипаттамалары

№	Көрсеткіш	Ауданы бойынша көлдердің жіктелімі		
		ірі	орташа	ұсақ
		n=5	n=7	n=13
1	Көл бетінің ауданы (А, мың м ²)	<u>57.3-3.89</u> 19.3	<u>13.7-0.31</u> 4.96	<u>4.20-0.21</u> 2.02
2	Орташа биіктік (Н, м)	<u>3900-3513</u> 3649	<u>3907-3416</u> 3618	<u>3750-3367</u> 3588
3	Ұзындығы (L, м)	<u>1077-108</u> 263	<u>502-28.3</u> 130	<u>239-22.7</u> 89.8
4	Ені (В, м)	<u>275-60</u> 131	<u>112-20.0</u> 67.0	<u>70.0-10.3</u> 41.9
5	Орташа ені (В _{орт} , м)	<u>153-21.3</u> 74.1	<u>71.4-10.8</u> 38.5	<u>44.7-7.73</u> 24.2
6	Жаға сызығы ұзындығы (К, м)	<u>1464-320</u> 719	<u>601-80.0</u> 345	<u>360-60.9</u> 218
7	Жаға сызығының дамуы (К _і)	<u>2.14-1.07</u> 1.52	<u>1.80-1.12</u> 1.43	<u>2.15-1.10</u> 1.40
8	К _{жаға}	<u>0.10-0.02</u> 0.05	<u>0.26-0.04</u> 0.09	<u>0.29-0.07</u> 0.12
9	К _{созың}	<u>26.9-1.65</u> 4.70	<u>24.4-1.97</u> 4.09	<u>13.7-0.31</u> 4.96
10	К _{жинақ}	<u>0.73-0.17</u> 0.56	<u>0.74-0.23</u> 0.58	<u>0.89-0.20</u> 0.58
11	Көлемі (V, мың м ³)	<u>419-9.00</u> 100	<u>53.6-0.23</u> 13.7	<u>9.70-0.13</u> 3.57

№	Көрсеткіш	Ауданы бойынша көлдердің жіктелімі		
		ірі	орташа	ұсақ
		n=5	n=7	n=13
1	Көл бетінің ауданы (А, мың м ²)	<u>57.3-3.89</u> 19.3	<u>13.7-0.31</u> 4.96	<u>4.20-0.21</u> 2.02
2	Орташа биіктік (Н, м)	<u>3900-3513</u> 3649	<u>3907-3416</u> 3618	<u>3750-3367</u> 3588
3	Ұзындығы (L, м)	<u>1077-108</u> 263	<u>502-28.3</u> 130	<u>239-22.7</u> 89.8
12	Орташа тереңдігі (D, м)	<u>7.32-2.24</u> 4.31	<u>3.90-0.73</u> 2.38	<u>2.32-0.62</u> 1.64

Ескерту: алымында «максимум – минимум», ал бөлімінде нақты көрсеткіштің орташа мәндері көрсетілген.

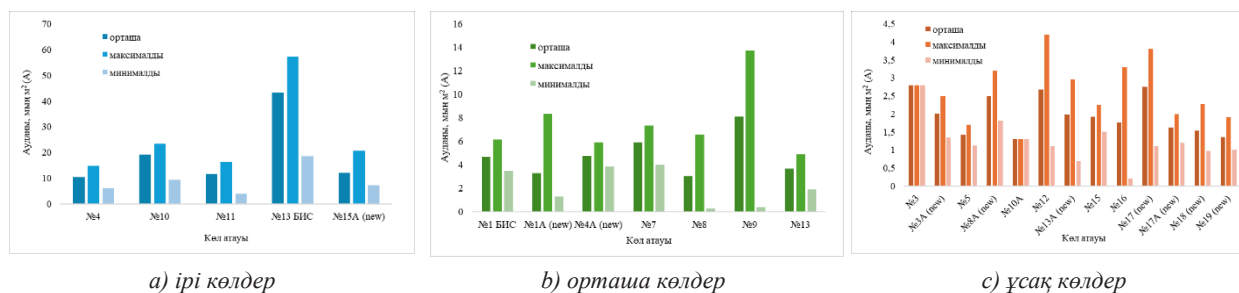
Ескерту: авторлар құрастырған

Көлдерді аудандық көрсеткіштері бойынша үш класқа бөлу олардың зерттеу кезеңіндегі морфометриялық айырмашылықтарын салыстырмалы түрде бағалауға мүмкіндік берді. Әрбір көл үшін

2015–2025 ж. аралығындағы су беті ауданының орташа, максималды және минималды мәндері есептеліп, олардың өзгеру ерекшеліктері жіктеу топтары бойынша салыстырылды (2-сурет).

2-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. су беті ауданының орташа, максималды және минималды мәндері



а) ірі көлдер

б) орташа көлдер

с) ұсақ көлдер

Ескерту: авторлар құрастырған

2-суретте келтірілген мәліметтер көлдердің аудандық көрсеткіштері әрбір класс шегінде де біркелкі еместігін көрсетеді. Ірі көлдерде су бетінің ауданы және оның жылдар бойынша өзгерісі анағұрлым жоғары мәндермен ерекшеленеді. Ал орташа және ұсақ көлдерде аудан көрсеткіштері салыстырмалы түрде төмен. Кейбір көлдерде максималды және минималды аудан мәндерінің айырмашылығы едәуір, бұл олардың көпжылдық кезеңде айтарлықтай өзгеріске ұшырағанын көрсетеді. Керісінше, аудан мәндері бір-біріне жақын көлдер зерттеу кезеңінде салыстырмалы түрде тұрақты болған.

ЖҚЗ және ЖБСМ мәліметтері негізінде жүргізілген талдау 2015-2025 жж. аралығында мұздықтық-мореналық көлдердің әртүрлі биіктік белдеулерінде таралғанын көрсетті. Ірі көлдер негізінен 3500-3900 м, орташа көлдер 3400-3900 м, ал ұсақ көлдер 3350-3750 м биіктік аралығында орналасқан. Олардың орташа орналасу биіктігі сәйкесінше шамамен 3650, 3620 және 3590 м құрады. Бұл көрсеткіштер көл көлемі ұлғайған сайын олардың орташа орналасу биіктігінің де біршама артатынын аңғартады. Сонымен қатар, ірі және орташа көлдердің таралуының жоғарғы шегі 3900 м-ге дейін жет-

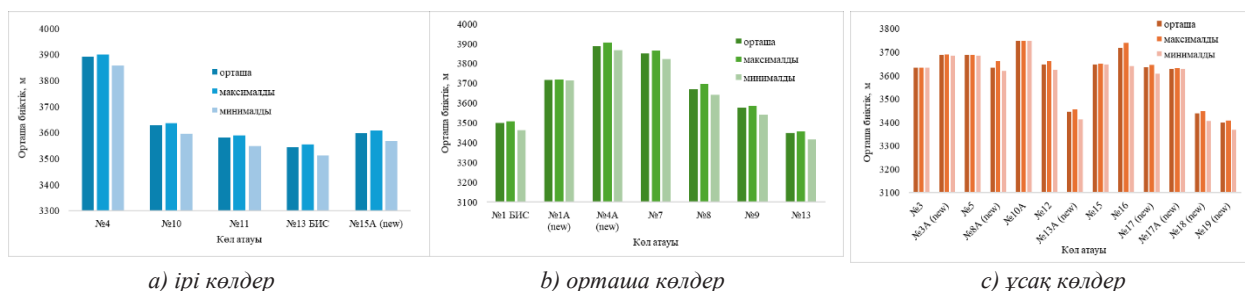
се, ұсақ көлдер көбіне 3750 м-ден төмен биіктіктерде шоғырланған.

Көлдердің биіктік бойынша таралу ерекшеліктерін нақтылау үшін 2015–2025 ж. аралы-

ғында әрбір көлдің орналасу биіктігінің орташа, максималды және минималды мәндері есептеліп, олардың аудандық топтары бойынша салыстырылды (3-сурет).

3-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. орналасу биіктіктерінің орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған

3-суретте ЖБСМ мәліметтері бойынша көлдердің орналасу биіктіктерінің аудандық топтар шегіндегі айырмашылықтары көрсетілген. Суреттегі минималды және максималды мәндер әрбір көл контуры қамтитын биіктік аралығын сипаттайды. Сондықтан бұл көрсеткіштерді көлдегі су деңгейінің жылдар бойынша ауытқуы ретінде қарастыруға болмайды.

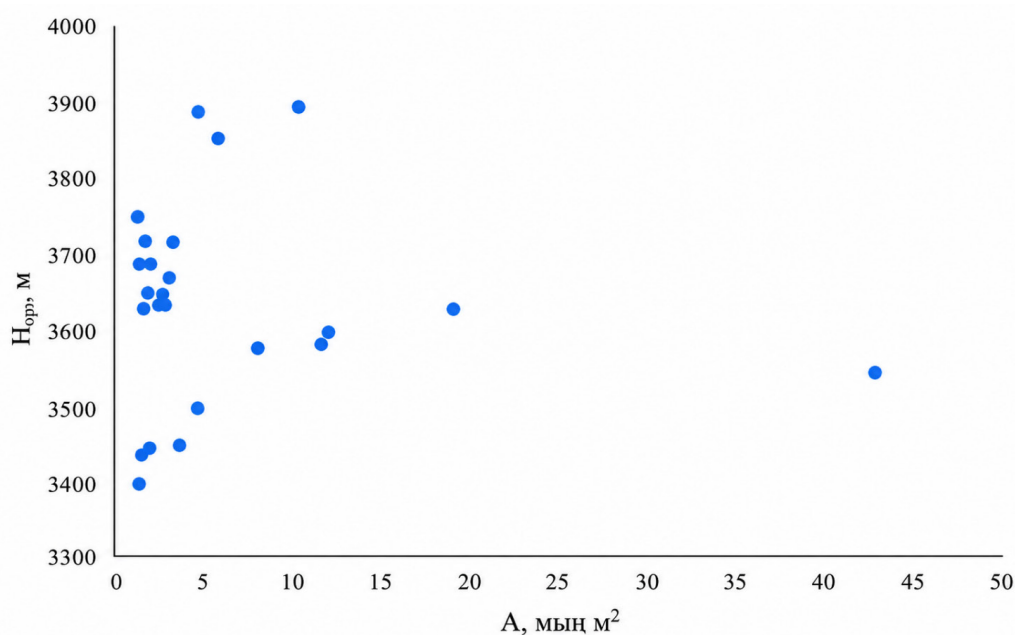
Мұздықтық-мореналық көлдердің биіктік бойынша таралу ерекшеліктері олардың қалыптасуы мен одан әрі дамуы жүретін қазіргі мұздықтық-мореналық кешендердің жағдайымен және ондағы өзгерістермен байланысты. Биік таулы аймақтарда мұздықтардың кейін шегінуі нәтижесінде мұздан босаған кеңістіктердің ұлғаюы, мореналық бедердегі тұйықталған ойыстардың қалыптасуы және көмілген мұздың еруі жаңа көлдердің пайда болуына және бұрын қалыптасқан көлдердің кеңеюіне жағдай жасайды. Сондықтан көлдердің абсолюттік биіктігін олардың аудандық көрсеткіштерімен бірге талдау мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік даму ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік береді. Көлдердің абсолюттік биіктігі мен су беті ауданы арасындағы өзара байланысты бағалау мақсатында

аталған көрсеткіштердің тәуелділігі талданды (4-сурет).

4-суреттен көлдердің су беті ауданы мен олардың орташа орналасу биіктігі арасында айқын сызықтық тәуелділік байқалмайтынын көруге болады. Детерминация коэффициентінің өте төмен мәні ($R^2 = 0,0034$) көл ауданының өзгерісін абсолюттік биіктік арқылы сызықтық модель негізінде түсіндіру мүмкіндігінің шектеулі екенін көрсетеді. Дегенмен графикте нүктелердің белгілі бір аудандық және биіктік диапазондары бойынша топтасуы байқалады, бұл көрсеткіштер арасында сызықтық емес немесе монотондық сипаттағы өзара байланыстың болуы мүмкін екенін жоққа шығармайды. Сонымен қатар, көлдерді ауданы бойынша ірі, орташа және ұсақ топтарға бөлу басқа морфометриялық көрсеткіштерді салыстырмалы талдауға да негіз болды. Қабылданған жіктеудің негізділігі осы топтардағы морфометриялық параметрлердің айырмашылықтарын салыстыру арқылы бағаланды. Көл ауданының қалыптасуы тек оның мөлшеріне ғана емес, қазаншұңқырдың морфологиясына, мореналық бедердің ерекшеліктеріне, мұздықпен кеңістіктік байланысына және су алмасу жағдайларына да тәуелді болуы мүмкін.

4-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. су беті ауданы мен орташа орналасу биіктігі



Ескерту: авторлар құрастырған

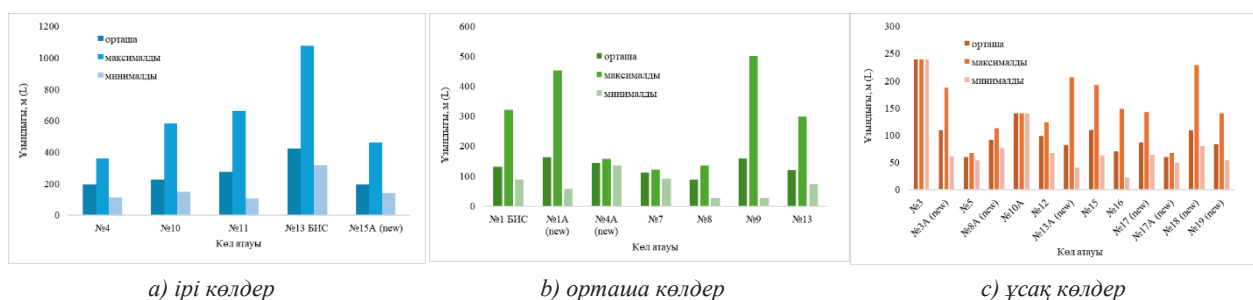
Мұздықтық-мореналық көлдердің ұзындығы (L) мен енін (B) анықтау олардың кеңістіктік пішіні мен даму ерекшеліктерін сипаттауға мүмкіндік береді. Үлкен Алматы өзені алабындағы көлдердің ғарыштық суреттер бойынша анықталған ұзындық және енін көрсеткіштері олардың пландық пішіні мен созылыңқылық дәрежесін бағалау үшін пайдаланылды. Бұл сипаттамалардың қалыптасуына көл қазаншұңқырының жер бедері, мореналық түзілімдердің конфигурациясы және көлдің мұздыққа қатысты орналасуы әсер етеді. Талдау нәтижелері көлдердің ұзындығы мен ені олардың аудандық топтарына байланысты айқын ерекшеленетінін көрсетті. Ірі көлдердің ұзындығы шамамен 100-1000 м аралығында өзгеріп, орташа мәні 260 м-ді құрады. Олардың ені 50-300 м аралығында болып, орташа есеппен 130 м болды. Орташа көлдерде ұзындық 30-500 м, ал ені 20-100 м аралығында өзгеріп, орташа мәндері сәйкесінше 130 және 70 м-ді құрады. Ұсақ көлдердің ұзындығы 20-250 м, ені 10-70 м шегінде өзгеріп, орташа көрсеткіштері тиісінше 90 және 40 м болды.

Осы мәліметтер көлдердің ауданы азайған сайын олардың орташа ұзындығы мен енінің де біртіндеп төмендейтінін көрсетеді. Сонымен бірге бір аудандық топқа жататын көлдердің өзінде бұл көрсеткіштердің едәуір кең аралықта өзгеруі көл қазаншұңқырларының морфологиялық жағдайлары мен пландық пішіндерінің әркелкі екенін аңғартады. Ұзындық пен енін көрсеткіштерінің көлдер арасындағы айырмашылықтарын нақтылау үшін 2015-2025 жж. аралығындағы олардың орташа, максималды және минималды мәндері аудандық топтар бойынша жеке қарастырылды (5, 6-суреттер).

5-суретте көлдердің ұзындық көрсеткіштері олардың аудандық топтарына сәйкес ерекшеленетіні байқалады. Ірі көлдер орташа және максималды ұзындықтарының жоғары мәндерімен сипатталса, орташа көлдерде бұл көрсеткіштер аралық деңгейде, ал ұсақ көлдерде төмен мәндерде қалыптасқан. Сонымен қатар, әрбір топ ішіндегі максималды және минималды ұзындықтардың айырмашылығы жекелеген көлдердің пландық пішіні мен созылыңқылық дәрежесінің әркелкі екенін көрсетеді.

5-сурет

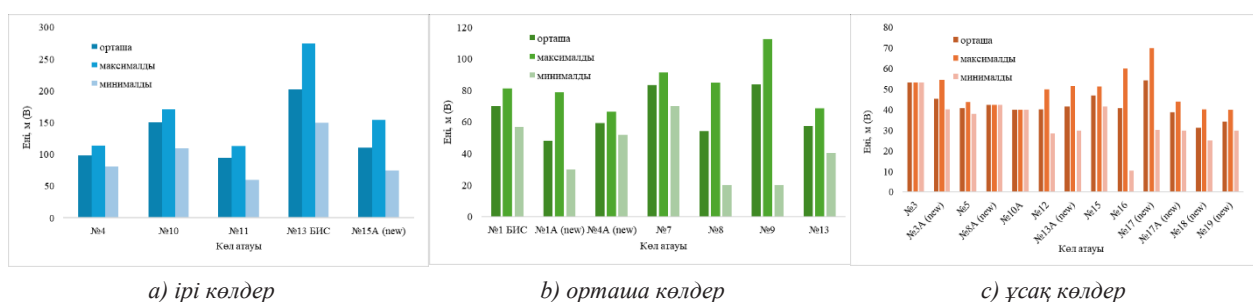
Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015-2025 жж. ұзындығының орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған

6-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015-2025 жж. енінің орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған

6-суретте көлдердің ен көрсеткіштері де олардың аудандық топтарына сәйкес өзгертіні байқалады. Көл ауданы ұлғайған сайын олардың көлденең өлшемдері жалпы алғанда артады. Сонымен бірге әрбір топ ішінде жекелеген көлдер арасындағы айырмашылықтардың сақталуы олардың пландық пішіні мен қазаншұңқыр морфологиясының әркелкі екенін көрсетеді.

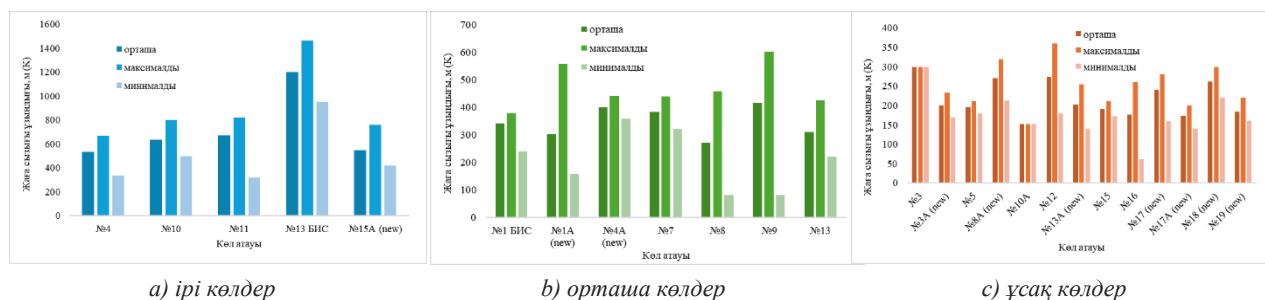
Жаға сызығының ұзындығы (К, м) көлдің пландық пішіні мен конфигурациясын сипаттайтын негізгі морфометриялық көрсеткіштердің бірі болып табылады және оның пішіндік ерекшеліктерін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді (Håkanson, 1981). Сонымен қатар, бұл көрсеткіш жаға сызығының даму коэффициентін есептеуде бастапқы параметр ретінде қолданылады. 2015–2025 ж. ғарыштық суреттер негізінде көл контурлары мен жаға сызығы ұзындығы-

ның өзгерістерін талдау мұздықтық-мореналық көлдердің кеңістіктік дамуы мен пішіндік ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік берді. Үлкен Алматы өзені алабында зерттелген 19 көлдің жаға сызығының ұзындығы шамамен 60-1500 м аралығында өзгерді (7-сурет). Ірі көлдерде бұл көрсеткіш 320-1500 м аралығында болып, орташа мәні 720 м құрады; орташа көлдерде 80-600 м аралығында өзгеріп, орташа мәні 350 м болды; ұсақ көлдерде шамамен 60-360 м аралығында қалыптасып, орташа мәні 220 м құрады. Көлдердің аудандық мәндері ұлғайған сайын жаға сызығы ұзындығы да жалпы алғанда артады, ал топ ішіндегі кең мәндер диапазоны көл пішіндерінің әркелкілігін көрсетеді.

ЖКЗ негізінде анықталған аудан және жаға сызығы көрсеткіштері арқылы жаға сызығының даму коэффициенті (K_f) есептелді (8-сурет).

7-сурет

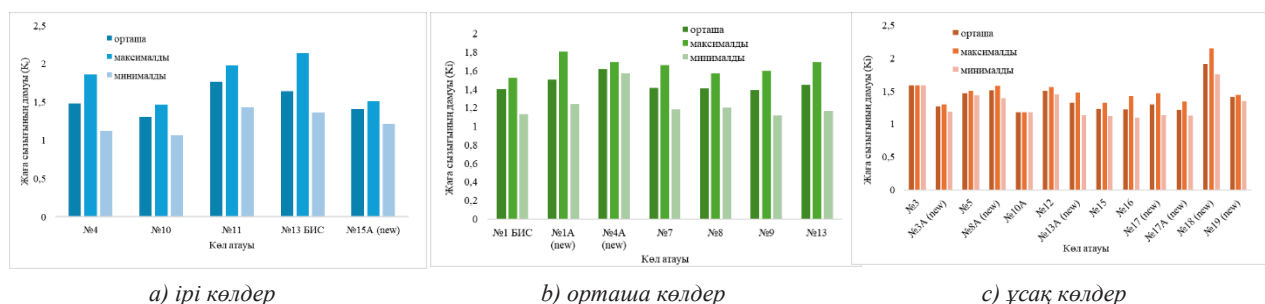
Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. жаға сызығы ұзындығының орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған.

8-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. жаға сызығының даму коэффициентінің орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған

K_d коэффициентінің 1-ге жуық мәні көл пішінінің шеңберге жақын екенін көрсетеді. Үлкен Алматы өзені алабында 2015–2025 ж. анықталған 19 көлдің 12-сі (48%) мұндай пішінге ие

болды (9-сурет). Зерттеу алабындағы K_d мәндері 1.07-2.15 аралығында өзгерді. Көл пішіні дұрыс геометриялық пішіннен ерекшеленген сайын коэффициент мәні жоғарылай түсті.

9-сурет

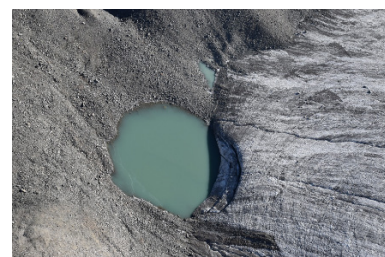
Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдер



№7 көл, 26.07.2021 ж.



№8 көл, 14.07.2023 ж.



№16 көл, 11.08.2021 ж.

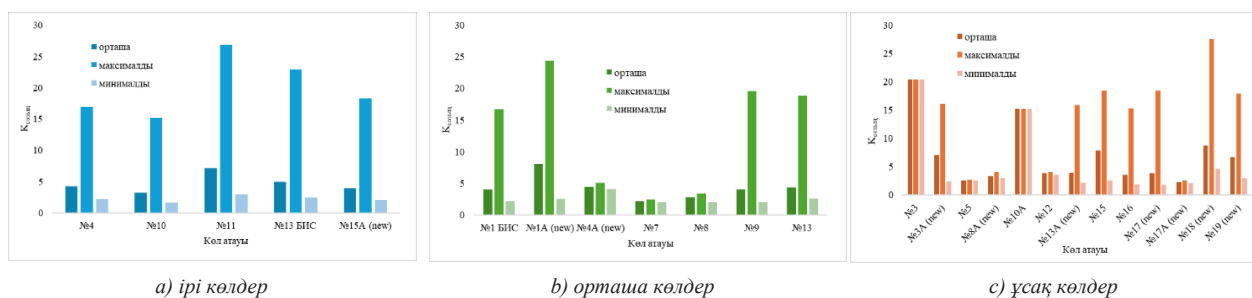
Ескерту: фотоматериалдар «Қазселденқорғау» ММ-нің 2024 жылғы «Үлкен Алматы өзені алабындағы мореналық көлдердің Паспортынан» алынған.

Созылыңқылық коэффициентінің ($K_{\text{созың}}$) минималды мәні абсолютті дөңгелек немесе шаршы пішінді су айдыны үшін 1-ге тең (Эдельштейн, 2020). Бұл коэффициент көл пішінінің бойлық бағытта қаншалықты созылғанын сандық тұрғыдан салыстыру үшін пай-

даланылды. Үлкен Алматы өзені алабындағы көлдер үшін орташа созылыңқылық коэффициенті шамамен 4.60 болды (10-сурет), бұл зерттелген объектілердің басым бөлігінде көл пішінінің шеңберлік пішіннен едәуір ауытқы-тынын көрсетеді.

10-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. созыңқылық коэффициентінің орташа, максималды және минималды мәндері



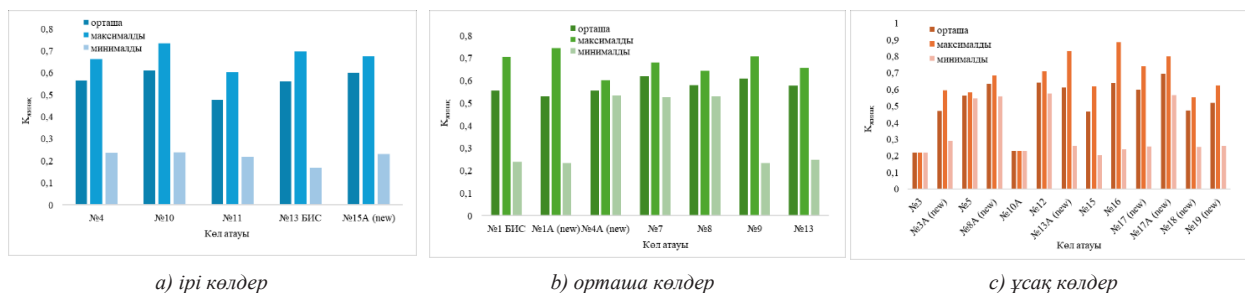
Ескерту: авторлар құрастырған

Көлдің жинақылық көрсеткіші ($K_{\text{жинақ}}$) көлдің көлденең өлшемдерінің арақатынасын сипаттайды және оның пландық конфигурациясының ерекшеліктерін салыстырмалы бағалау үшін пайдаланылды. Коэффициенттің 1-ге жақын мәндері көлдің орташа және максималды ендерінің шамалас екенін, ал көрсеткіштің төмендеуі максималды енді мен көлдің орташа көлденең өлшемі арасындағы айырмашылықтың артатынын көрсетеді. Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің жинақылық коэффициенті ірі көлдерде 0,17-0,73 аралығында өзгеріп, орташа мәні 0,56-ны құрады. Орташа көлдерде бұл көрсеткіш 0,23-0,74

аралығында болып, орташа мәні 0,58-ге тең болды. Ұсақ көлдерде жинақылық коэффициенті 0,20-0,89 аралығында өзгеріп, орташа есеппен 0,58-ді құрады (11-сурет). Нәтижелер үш аудандық топтағы орташа жинақылық көрсеткіштерінің бір-біріне жақын екенін көрсетеді. Алайда әрбір топ ішіндегі минималды және максималды мәндердің айтарлықтай айырмашылығы жеке-леген көлдердің пландық пішіні мен конфигурациясының әркелкі екенін аңғартады. Бұл ерекшелік көл қазаншұңқырлары пішінінің біркелкі еместігін және көл контурының көлденең әрі бойлық бағыттардағы даму сипатының әртүрлілігін қосымша сипаттайды.

11-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. жинақылық коэффициентінің орташа, максималды және минималды мәндері



Ескерту: авторлар құрастырған

Мұздықтық-мореналық көлдердің морфометриялық параметрлері аудандық көрсеткіштерге тәуелді болғандықтан, ЖҚЗ арқылы анықталған аудан көрсеткіштерінің дәлдігін бағалау үшін *RMSE*, *MAE*, *MAPE*, *PBIAS*, *NSE* және *RSR* статистикалық көрсеткіштері қолданылды. Эталондық таңдама ретінде «Қазселденқорғау» ММ түрлі жылдарда жүргізген батиметриялық түсірілім арқылы қол жеткізілген аудан көрсеткіштері алынды. Статистикалық критерийлер Moriasi et al. (2007) жұмысындағы нәтижелерге сәйкес интерпретацияланды. Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мо-

реналық көлдер аудандары бойынша $MAPE = 30.8\%$, $PBIAS = -7.26\%$, $NSE = 0.67$ және $RSR = 0.57$, бұл есептік және эталондық мәліметтер арасындағы сәйкестіктің жалпы алғанда қанағаттанарлық деңгейді көрсетеді. Қателіктердің орын алу ықтимал себептерінің бірі – Sentinel-2 суреттері мен «Қазселденқорғау» ММ пайдаланған материалдардың түсірілім мерзімдерінің сәйкес келмеуі.

2015–2025 ж. кезеңі үшін есептік және эталондық мәліметтердің көл ауданы бойынша 26 жұбы салыстырылды. Дәлдікті бағалау нәтижелері 5-кестеде келтірілген.

5-кесте

Есептік және эталондық аудан көрсеткіштерінің статистикалық дәлдігін бағалау нәтижелері

Мәндер	Қателіктер					
	RSR	NSE	MAPE, %	RMSE, мың м ² /м ³	MAE, мың м ² /м ³	PBIAS, %
ЖҚЗ мәліметтері бойынша аудан	0.57	0.67	30.8	11.5	6.94	-7.26

Ескерту: авторлар құрастырған

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдер ауданының статистикалық дәлдігін бағалау нәтижелері қанағаттанарлық болғандықтан, ЖҚЗ бойынша қол жеткізілген нәтижелерді туынды морфометриялық сипаттамаларды анықтау үшін орынды деп саналды.

Аудан арқылы Попов және Хюгель формулаларының көмегімен анықталған мұздықтық-мореналық көлдердің көлем мәндері статистикалық көрсеткіштер бойынша 19 жұптан тұратын эталондық таңдамамен салыстырылды (6-кесте).

6-кесте

Есептік және эталондық көлем көрсеткіштерінің статистикалық дәлдігін бағалау нәтижелері

Мәндер	Қателіктер					
	RSR	NSE	MAPE, %	RMSE, мың м ² /м ³	MAE, мың м ² /м ³	PBIAS, %
Попов Н.В. бойынша көлем	0.66	0.56	58.7	85.6	53.3	+11.2
Хюгель бойынша көлем	0.98	0.04	107	127	81.3	+59.1

Ескерту: авторлар құрастырған

Көл көлемін анықтауда Попов формуласының қарастырылған статистикалық көрсеткіштер бойынша эталондық мәліметтерге жақсырақ сәйкестік беретінін көрсетті. Moriasi et al. (2007) шкаласын салыстырмалы критерий ретінде қолданғанда Попов формуласының нәтижелері қанағаттанарлық, ал Хюгель формуласының нәтижелері қанағаттанарлықсыз деңгейге сәйкес

келді. Сондықтан кейінгі көлемдік талдау Попов формуласы бойынша есептелген қатар негізінде жүргізілді.

Көлемі бойынша көлдер үш шартты санатқа бөлінді: кіші көлдер – 10 мың м³-ден аз; орташа көлдер – 10-100 мың м³; ірі көлдер – 100 мың м³-ден жоғары (7-кесте). Бұл жіктеу көлемдік динамиканы салыстырмалы талдау үшін қолданылды.

7-кесте

Үлкен Алматы өзені алабы бойынша мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. аралығындағы есептік көлемдік сипаттамалары

Жыл	Класс бойынша көлемі, мың м³	Көлемі бойынша көлдер	Саны	Жалпы саннан үлесі, %
2015	Кіші көлдер (<10)	№13, №13А (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған)	3	30.0
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), 1 БИС, №11, №9, №4	5	50.0
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС, №10	2	20.0
2016	Кіші көлдер (<10)	№16, №15, №13А (қосымша анықталған), №19 (қосымша анықталған), №10А, №3, №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №3А (қосымша анықталған)	9	50.0
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №13, №1 БИС, №11, №1А (қосымша анықталған), №9, №4	7	38.9
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС, №10	2	11.1
2017	Кіші көлдер (<10)	№16, №15, №13А (қосымша анықталған), №8, №1 БИС	5	41.7
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №13, №11, №10, №9, №4	6	50.0
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	8.33
2018	Кіші көлдер (<10)	№16, №15, №13, №13А (қосымша анықталған), №1А (қосымша анықталған), №19 (қосымша анықталған), №8, №3А (қосымша анықталған), №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №17А (қосымша анықталған)	11	61.1
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №1 БИС, №11, №9, №4	5	27.8
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС, №10	2	11.1
2019	Кіші көлдер (<10)	№16, №13, №11, №1А (қосымша анықталған), №8, №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №17А (қосымша анықталған), №7	9	60.0
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №1 БИС, №10, №9, №4	5	33.3
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	6.67
2020	Кіші көлдер (<10)	№16, №13, №13А (қосымша анықталған), №1 БИС, №12, №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №17А (қосымша анықталған), №1А (қосымша анықталған), №5, №7	11	61.1
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №11, №10, №9, №8, №4	6	33.3
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	5.56
2021	Кіші көлдер (<10)	№16, №13, №13А (қосымша анықталған), №12, №1А (қосымша анықталған), №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №17А (қосымша анықталған), №19 (қосымша анықталған)	9	50.0
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №7, №1 БИС, №11, №10, №9, №8, №4	8	44.4
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	5.56
2022	Кіші көлдер (<10)	№16, №13А (қосымша анықталған), №12, №5, №8А (қосымша анықталған), №3А (қосымша анықталған), №4А (қосымша анықталған), №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №17А (қосымша анықталған)	10	52.6
	Орташа көлдер (10–100)	№15А (қосымша анықталған), №13, №7, №1 БИС, №11, №9, №4	7	36.8
	Ірі көлдер (>100)	№10, №13 БИС	2	10.5

Жыл	Класс бойынша көлемі, мың м ³	Көлемі бойынша көлдер	Саны	Жалпы саннан үлесі, %
2023	Кіші көлдер (<10)	№18, №1 БИС, №9, №12, №13, №17 (қосымша анықталған), №13А (қосымша анықталған), №8, №16	10	62.5
	Орташа көлдер (10–100)	№10, №4, №7, №15А (қосымша анықталған), №11	5	31.3
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	6.25
2024	Кіші көлдер (<10)	№19 (қосымша анықталған), №8А (қосымша анықталған), №18 (қосымша анықталған), №17 (қосымша анықталған), №16, №13А (қосымша анықталған), №13, №9, №8, №12	10	55.6
	Орташа көлдер (10–100)	№7, №4А (қосымша анықталған), №15А (қосымша анықталған), №1 БИС, №11, №4	6	33.3
	Ірі көлдер (>100)	№10, №13 БИС	2	11.1
2025	Кіші көлдер (<10)	№1 БИС, №8, №8А (қосымша анықталған), №9, №12, №13, №13А (қосымша анықталған), №16, №17 (қосымша анықталған), №18 (қосымша анықталған)	10	58.8
	Орташа көлдер (10–100)	№4, №4А (қосымша анықталған), №7, №10, №11, №15А (қосымша анықталған)	6	35.3
	Ірі көлдер (>100)	№13 БИС	1	5.90

Ескерту: авторлар құрастырған

Үлкен Алматы өзен алабында 2015–2025 ж. аралығында негізінен №13 БИС арқылы көрініс берген ірі көлдердің үлестірілуі бастапқы жылдары жалпы көлдер санының 10-30% құраса, соңғы жылдары айтарлықтай төмендеген және оны «Қазселденқорғау» ММ арқылы жүзеге асырылатын көлді босату жұмыстарымен түсіндіруге болады.

Зерттеу кезеңінде көлдердің есептік көлемі бір бағытта өзгермей, өсу және кему фазаларының кезектесуімен сипатталды. Жылдар бойынша анықталған көлдер саны да тұрақсыз болды: 2015 жылы 10 көл тіркелсе, 2025 жылы 17 көл анықталды, ал ең жоғары саны 2022 жылы 19 көлге жетті. Сондықтан көпжылдық динамиканы бағалауда жекелеген жылдардағы морфометриялық өзгерістер мен объектілердің анықталу тұрақтылығы қатар ескерілді.

2015–2025 ж. көлемдік көрсеткіштерді талдау ең ірі абсолюттік өсім №13 БИС көлінде 2018-2019 жж. байқалғанын көрсетті (12а-сурет): оның есептік көлемі 202 мың м³-ден 317 мың м³-ге дейін ұлғайып, өсімі 56.9%-ды құрады. Зерттеу кезеңіндегі ең жоғары есептік көлемі 2023 жылы 419 мың м³-ге жетті. Көлде су көлемін азайтуға бағытталған іс-шаралар жүргізілетінін ескергенде, жекелеген жылдардағы қайта ұлғаю еріген сулардың келуімен және қоректену аймағындағы мұздықтардың деградациясымен

байланысты болуы мүмкін. Осы ерекшелік №13 БИС көлін тұрақты бақылауды қажет ететін басым объектілердің бірі ретінде қарастыруға негіз береді.

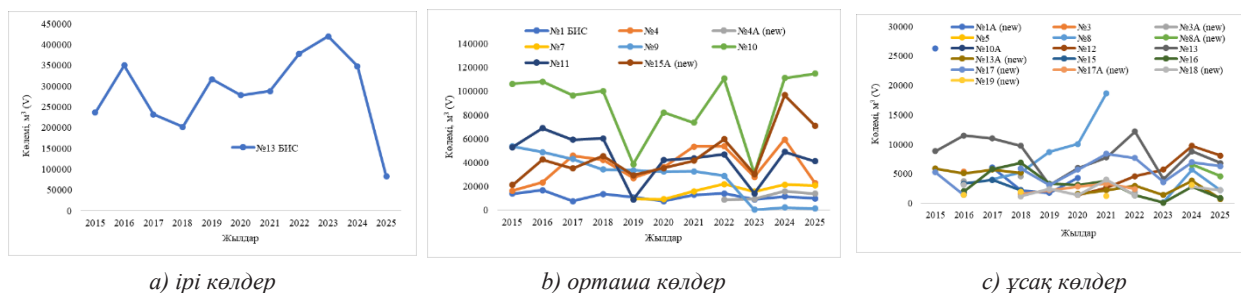
2019 және 2023 жылдары орташа көлемдік санаттағы көлдердің динамикасы салыстырмалы төмен мәндермен, ал 2022 және 2024 жылдары жоғары көрсеткіштермен сипатталды (12b-сурет).

Кіші көлемдік санаттағы көлдердің көрсеткіштері айтарлықтай тұрақсыз болды. Кейбір жылдары олардың шағын ауданы мен суреттегі анықталу жағдайларына байланысты жекелеген объектілер жерсеріктік суреттерден анықталмады (12с-сурет).

Мұздықтық-мореналық көлдердің орташа тереңдігі (D , m) тікелей батиметриялық өлшеулер арқылы емес, есептік көл көлемінің су беті ауданына қатынасы негізінде анықталды. Сондықтан бұл көрсеткіш көл қазаншұңқырларының салыстырмалы су сыйымдылығын сипаттайды, бірақ көлдің нақты максималды тереңдігін көрсетпейді. Зерттелген көлдерде есептік орташа тереңдіктің ең жоғары мәндері 7 м-ден асса, ең төменгі мәндері шамамен 0,6-1,5 м аралығында болды (13-сурет). Көлемдік топтар бойынша орташа тереңдік ірі көлдерде 4,31 м, орташа көлдерде 2,38 м, ал ұсақ көлдерде 1,64 м құрады.

12-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. есептік көлемдік мәндерінің өзгерісі



а) ірі көлдер

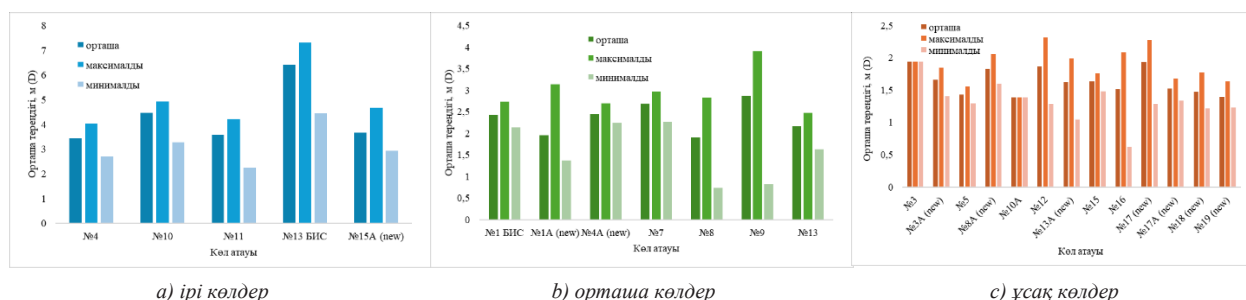
б) орташа көлдер

в) ұсақ көлдер

Ескерту: авторлар құрастырған

13-сурет

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. есептік орташа тереңдігінің орташа, максималды және минималды мәндері



а) ірі көлдер

б) орташа көлдер

в) ұсақ көлдер

Ескерту: авторлар құрастырған

Алынған нәтижелер Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. аралығындағы дамуы біркелкі болмағанын көрсетті. Көлдер санының, су беті ауданы мен есептік көлемінің жылдар бойынша өзгеруі олардың морфометриялық жағдайының кеңістіктік және уақыттық тұрғыдан құбылмалы екенін байқатады. Көлдердің өлшемдік топтары бойынша бірқатар морфометриялық параметрлерінде айырмашылық байқалғанымен, су беті ауданы мен басқа морфометриялық параметрлер арасындағы тәуелділіктің байқалуы көлдердің кеңістіктік және уақыттық таралуында оларды кешенді түрде зерттеу қажет екендігін көрсетті. Сондай-ақ қазаншұңқыр морфологиясы, мореналық бедердің конфигурациясы, мұздықпен кеңістіктік байланыс және еріген сулардың келуі сияқты факторлардың жиынтық әсері көлдердің кеңістіктік-уақыттық таралуының заңдылықтарын өзгертуге ықпал ете алады.

Жекелеген объектілердің динамикасы да әркелкі болды. №13 БИС көлі аудандық және

есептік көлемдік көрсеткіштері бойынша басқа объектілерден айқын ерекшеленіп, жоғары өзгергіштік танытты. Жерсеріктік және далалық бақылаулар мерзімдерінің сәйкес келмеуі (Daiyrov et al., 2022), эталондық мәліметтер санының шектеулілігі (Cook & Quincey, 2015) және көлем мен орташа тереңдіктің эмпирикалық тәуелділіктер арқылы есептелуі (Kapitsa et al., 2023), сонымен қатар жерсеріктік түсірілімдердің кеңістіктік кескінделу мүмкіндігі (Mussina et al., 2025) нәтижелерді интерпретациялауда ескерілуі тиіс. Сондықтан бір мерзімге барынша жақын ЖҚЗ және батиметриялық өлшеулерді үйлестіру кейінгі зерттеулердің негізгі бағыты болуы қажет.

Қорытынды

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздықтық-мореналық көлдердің 2015–2025 ж. кеңістіктік және уақыттық өзгерістерін ЖҚЗ, ЖБСМ және ГАЗ технологиялары негізінде кешенді

бағалау олардың саны мен негізгі морфометриялық сипаттамаларының жылдар бойынша тұрақсыздығын көрсетті. Көлдер саны 10-19 аралығында ауытқып, бастапқы жылғы 10 көлмен салыстырғанда соңғы жылы олардың саны 17-ні құрады. 2025 жылғы ЖҚЗ мәліметтерін ресми паспорттық тізіммен салыстыру нәтижесінде алты қосымша объект айқындалды, бұл инвентаризациялық мәліметтерді жүйелі түрде жаңартуда қашықтан зондау мәліметтерінің кеңістіктік кескінделу мүмкіндігін, датасын, өңдеу және түзету әдістерін, индекстер мен олардың шектік мәндерін таңдауда мұқият болуды талап етеді.

Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздық-мореналық көлдерді ЖҚЗ, ЖБСМ және ГАЗ технологиялары негізінде инвентаризациялау барысында 12 морфометриялық сипаттама анықталып, олар көлдердің аудандық топтарына сәйкес талданды. Зерттеу нәтижелері морфометриялық көрсеткіштердің басым бөлігі көл ауданына тікелей немесе кері тәуелді екенін көрсетті. Осыған байланысты ЖҚЗ мәліметтері бойынша анықталған көл аудандарының дәлдігі алты статистикалық критерий негізінде бағаланды. Бағалау нәтижелері Үлкен Алматы өзені алабындағы мұздық-мореналық көлдер үшін алынған аудандық көрсеткіштердің дәлдігі қанағаттанарлық деңгейде екенін көрсетті.

Зерттеудің ғылыми маңызы мұздық-мореналық көлдердің көпжылдық өзгерістерін аудан, биіктік, сызықтық өлшемдер, жаға сызығы, пішін коэффициенттері және есептік көлем көрсеткіштерін өзара байланыстыра бағалауда көрінеді. Нәтижелерді мұздық-мореналық көлдердің паспорттық мәліметтерін өзектендіруде, тұрақсыз өзгертін объектілерді басым бақылауға ұсынуға және далалық жұмыстарды жоспарлауда қолдануға болады. Кейінгі зерттеулерде

жерсеріктік түсірілімдер мен батиметриялық өлшеулерді уақыт бойынша үйлестіру, жоғары кеңістіктік кескінделу мүмкіндігіне ие ЖҚЗ және ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) мәліметтерін пайдалану, сондай-ақ көлдер мен оларды қоректендіретін мұздықтардың өзгерістерін біртұтас жүйе ретінде қарастыру ұсынылады.

Қаржыландыру

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант BR28713751 «Іле және Күнгей Алатауы беткейлері өзен алаптарындағы аса қауіпті мореналық көлдер қаупін басқарудың кешенді жүйесін әзірлеу»).

Мүдделер қақтығысы

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлар үлесі

Тұжырымдаманы әзірлеу – А.К. Мусина; Әдіснама – А.К. Мусина, М.Н. Тұрсынғали, Ә.С. Абдуллаева; Бағдарламалық қамтамасыз ету – М.Н. Тұрсынғали, М.С. Оспанова, Ж.У. Бексултанова; Валидация – М.С. Оспанова, Ж.У. Бексултанова, Е.Қ. Ермаш; Формалды талдау – А.К. Мусина, М.Н. Тұрсынғали; Зерттеу – А.К. Мусина; Ресурстар – Ә.С. Абдуллаева, М.С. Оспанова, Ж.У. Бексултанова; Мәліметтерді өңдеу – А.К. Мусина; Мақаланың бастапқы нұсқасын жазу – А.К. Мусина, М.Н. Тұрсынғали; Қарау және редакциялау – А.К. Мусина, М.Н. Тұрсынғали, Ә.С. Абдуллаева, М.С. Оспанова, Ж.У. Бексултанова, Е.Қ. Ермаш; Визуализация – Е.Қ. Ермаш; Ғылыми жетекшілік – А.К. Мусина; Жобаны басқару – М.Н. Тұрсынғали; Қаржыландыруды тарту – А.К. Мусина.

Әдебиеттер

- Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59(3), 1691–1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- Chen, J., Yang, S., Li, H., Zhang, B., & Lv, J. (2013). Research on geographical environment unit division based on the method of Natural Breaks (Jenks). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4/W3, 47–50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- Chen, M., Chen, Y., Fang, G., Zheng, G., Li, Z., Li, Y., & Zhu, Z. (2024). Risk assessment of glacial lake outburst flood in the Central Asian Tianshan Mountains. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 209. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00755-6>
- Cook, S. J., & Quincey, D. J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3, 559–575. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>

- Daiyrov, M., Kattel, D. B., Narama, C., & Wang, W. (2022). Evaluating the variability of glacial lakes in the Kyrgyz and Teskey ranges, Tien Shan. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 850146. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.850146>
- Эдельштейн, К. К. (2020). *Лимнология: Учебное пособие для среднего профессионального образования* (2-е изд., испр. и доп.). Юрайт.
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilimek, V., & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *CATENA*, 147, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.032>
- Григорьев, С. В. (1959). О некоторых определениях и показателях в озераведении. *Труды Карельского филиала АН СССР*, 18, 29–45.
- Håkanson, L. (1981). *A manual of lake morphometry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81563-8>
- Hollister, J., & Stachelek, J. (2017). lakemorpho: Calculating lake morphometry metrics in R. *F1000Research*, 6, Article 1718. <https://doi.org/10.12688/f1000research.12512.1>
- Huggel, C., Kääb, A., Haeblerli, W., Teysseire, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/T01-099>
- Институт ионосферы. (2025). *Разработка методов оценки факторов риска прорыва моренных озер в труднодоступных участках Иле-Алатау: Отчет о научно-исследовательской работе (заключительный)* (№ О.01178).
- Институт ионосферы. *Moraine Lake Ile Alatau: Разработка методов оценки факторов риска прорыва моренных озер в труднодоступных участках Иле-Алатау*. <https://morainelakes.kz/>
- Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Kasatkin, N., Severskiy, I., Kasenov, M., Yegorov, A., & Tatkova, M. (2023). Bathymetries of proglacial lakes: A new data set from the northern Tien Shan, Kazakhstan. *Frontiers in Earth Science*, 11, Article 1192719. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1192719>
- Kaushik, S., Singh, T., Joshi, P.K., & Dietz, A.J. (2022). Automated mapping of glacial lakes using multisource remote sensing data and deep convolutional neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103085>
- Керемкулов, В. А. (1985). Морфометрические характеристики и классификация моренных озер. *Селевые потоки*, 9, 36–46.
- Керемкулов, В. А., & Киренская, Т. Л. (1985). О прогнозировании прорыва моренных озер. *Селевые потоки*, 9, 84–92.
- Lesi, M., Nie, Y., Shugar, D. H., Wang, J., Deng, Q., Chen, H., & Fan, J. (2022). Landsat- and Sentinel-derived glacial lake dataset in the China-Pakistan Economic Corridor from 1990 to 2020. *Earth System Science Data*, 14(12), 5489–5512. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5489-2022>
- Leigh, J. R., Stokes, C. R., Carr, R. J., Evans, I. S., Andreassen, L. M., & Evans, D. J. A. (2019). Identifying and mapping very small (<0.5 km²) mountain glaciers on coarse to high-resolution imagery. *Journal of Glaciology*, 65(254), 873–888. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.50>
- Medeu, A. R., Popov, N. V., Blagovechshenskiy, V. P., Askarova, M. A., Medeu, A. A., Ranova, S. U., Kamalbekova, A., & Bolch, T. (2022). Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan. *Earth-Science Reviews*, 229, Article 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muneeb, F., Baig, S. U., Khan, J. A., & Khokhar, M. F. (2021). Inventory and GLOF susceptibility of glacial lakes in Hunza River Basin, Western Karakorum. *Remote Sensing*, 13(9), Article 1794. <https://doi.org/10.3390/rs13091794>
- Мусина, А. К., Абдуллаева, Ә. С., Тұрсынғали, М. Н., Наконова, Қ. М., & Қайрат, С. Е. (2025). Іле Алатауының солтүстік беткейінің орталық және шығыс бөлігіндегі мұздық-мореналық көлдердің кеңістіктік-уақыттық үлестірілуін талдау. *География және су ресурстары*, (4), 57–74. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-4-57-74.46>
- Mussina, A., Raimbekova, Z., Shahgedanova, M., Barandun, M., Narbayeva, K., Abdullayeva, A., & Nyssanbayeva, A. (2023). Mountain resilience: A tool for mudflow risk management in the Ile Alatau Mountains, Kazakhstan. *Mountain Research and Development*, 43(1), D1–D10. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-22-00004>
- Mussina, A., Abdullayeva, A., Barandun, M., Cicoira, A., & Tursyngali, M. (2024). 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*, 63, 19–24. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- Mussina, A., Tursyngali, M., Duskayev, K., Rodrigo-Illari, J., Rodrigo-Clavero, M.-E., & Abdullayeva, A. (2025). Forecasting channel morphodynamics in the Ulken Almaty River (Ile Alatau, Kazakhstan). *Water*, 17(13), Article 2029. <https://doi.org/10.3390/w17132029>
- Perivolioti, T.-M., Apostolakis, A., Papadimos, D., & Tsiaoussi, V. (2025). Bathymetry and morphometric analysis of Greek natural lakes through a hybrid GIS-acoustic methodology. *Inland Waters*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/20442041.2024.2447173>
- Попов, Н. В. (1987). Прорывные гляциальные сели и борьба с ними в горах Северного Тянь-Шаня. *Материалы гляциологических исследований*, 59, 189–195.
- Popov, N. V. (1991). Assessment of glacial debris flow hazard in the north Tien-Shan. In *Proceedings of the Soviet-China-Japan Symposium and Field Workshop on Natural Disasters* (pp. 384–391).
- Попов, Н. В., Ранова, С. У., Камалбекова, А. Н., Алдабергенов, Ұ. Р., & Скоринцева, И. Б. (2025). Аналитический обзор исследований прорывных гляциальных селей в Казахстане. *География и водные ресурсы*, (1), 125–139. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-125-139.12>

Prakash, C., & Nagarajan, R. (2017). Glacial lake inventory and evolution in northwestern Indian Himalaya. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12), 5284–5294. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2767098>

Shahgedanova, M., Saidaliyeva, Z., Mussina, A., Kapitsa, V., Raimbekova, Z., Donskikh, D., Kissebayev, D., Kasenov, M., & Petrov, M. (2024). Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: Regional database, meteorological triggers, and trends. *npj Natural Hazards*, 1, Article 49. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00050-7>

Song, C., Fan, C., Ma, J., Zhan, P., & Deng, X. (2025). A spatially constrained remote sensing-based inventory of glacial lakes worldwide. *Scientific Data*, 12, Article 464. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04809-z>

Государственный гидрологический институт. (2017). *СТО ГГИ 52.08.40-2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам Российской Федерации и спутниковым снимкам*. РПЦ Офорт.

Сыдык, Н. Қ., Искалиева, Г. М., Калдыбаев, А. А., Мерекеев, А. А., Абишев, Б. Ж., Амангелді, Ә. А., & Сағат, М. С. (2025). *Оценка состояния ледников и моренных озер Иле Алатау*. Дарын.

Верещагин, Г. Ю. (1930). *Методы морфометрической характеристики озер*. Труды Олонейской научной экспедиции, Ч. 2, Вып. 1.

Wangchuk, S., & Bolch, T. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. *Science of Remote Sensing*, 2, Article 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>

Wu, R., Liu, G., Zhang, R., Wang, X., Li, Y., Zhang, B., Cai, J., & Xiang, W. (2020). A Deep Learning Method for Mapping Glacial Lakes from the Combined Use of Synthetic-Aperture Radar and Optical Satellite Images. *Remote Sensing*, 12(24), 4020. <https://doi.org/10.3390/rs12244020>

Yin, L., Wang, X., Du, W., Yang, C., Wei, J., Wang, Q., Lei, D., & Xiao, J. (2024). Using the Improved YOLOv5-Seg Network and Sentinel-2 Imagery to Map Glacial Lakes in High Mountain Asia. *Remote Sensing*, 16(12), 2057. <https://doi.org/10.3390/rs16122057>

References

Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>

Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59(3), 1691–1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>

Chen, J., Yang, S., Li, H., Zhang, B., & Lv, J. (2013). Research on geographical environment unit division based on the method of Natural Breaks (Jenks). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-4/W3*, 47–50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>

Chen, M., Chen, Y., Fang, G., Zheng, G., Li, Z., Li, Y., & Zhu, Z. (2024). Risk assessment of glacial lake outburst flood in the Central Asian Tianshan Mountains. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 209. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00755-6>

Cook, S. J., & Quincey, D. J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3, 559–575. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>

Daiyrov, M., Kattel, D. B., Narama, C., & Wang, W. (2022). Evaluating the variability of glacial lakes in the Kyrgyz and Teskey ranges, Tien Shan. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 850146. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.850146>

Edelshtein, K. K. (2020). *Limnologiya: Uchebnoe posobie dlya srednego professional'nogo obrazovaniya* [Limnology: Textbook for secondary vocational education] (2nd ed., rev. and enl.). Yurait.

Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V., & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *CATENA*, 147, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.032>

Grigor'ev, S. V. (1959). O nekotorykh opredeleniyakh i pokazatelyakh v ozerovedenii [On some definitions and indicators in limnology]. *Trudy Karel'skogo filiala AN SSSR*, 18, 29–45.

Håkanson, L. (1981). *A manual of lake morphometry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81563-8>

Hollister, J., & Stachelek, J. (2017). lakemorpho: Calculating lake morphometry metrics in R. *F1000Research*, 6, Article 1718. <https://doi.org/10.12688/f1000research.12512.1>

Huggel, C., Käb, A., Haeblerli, W., Teyssie, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/T01-099>

Institut ionosfery. (2025). *Razrabotka metodov otsenki faktorov riska proryva morennykh ozer v trudnodostupnykh uchastkakh Ile-Alatau* [Development of methods for assessing risk factors of moraine lake outbursts in inaccessible areas of the Ile Alatau] (Final research report No. O.01178).

Institut ionosfery. *Moraine Lake Ile Alatau: Razrabotka metodov otsenki faktorov riska proryva morennykh ozer v trudnodostupnykh uchastkakh Ile-Alatau* [Moraine Lake Ile Alatau: Development of methods for assessing risk factors of moraine lake outbursts in inaccessible areas of the Ile Alatau]. <https://morainelakes.kz/>

Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Kasatkin, N., Severskiy, I., Kasenov, M., Yegorov, A., & Tatnova, M. (2023). Bathymetries of proglacial lakes: A new data set from the northern Tien Shan, Kazakhstan. *Frontiers in Earth Science*, 11, Article 1192719. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1192719>

- Kaushik, S., Singh, T., Joshi, P.K., & Dietz, A.J. (2022). Automated mapping of glacial lakes using multisource remote sensing data and deep convolutional neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103085>
- Keremkulov, V. A. (1985). Morfometricheskie kharakteristiki i klassifikatsiya morennykh ozer [Morphometric characteristics and classification of moraine lakes]. *Selevye potoki*, 9, 36–46.
- Keremkulov, V. A., & Kirenskaya, T. L. (1985). O prognozirovani proryva morennykh ozer [On forecasting moraine lake outbursts]. *Selevye potoki*, 9, 84–92.
- Lesi, M., Nie, Y., Shugar, D. H., Wang, J., Deng, Q., Chen, H., & Fan, J. (2022). Landsat- and Sentinel-derived glacial lake dataset in the China-Pakistan Economic Corridor from 1990 to 2020. *Earth System Science Data*, 14(12), 5489–5512. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5489-2022>
- Leigh, J. R., Stokes, C. R., Carr, R. J., Evans, I. S., Andreassen, L. M., & Evans, D. J. A. (2019). Identifying and mapping very small (<0.5 km²) mountain glaciers on coarse to high-resolution imagery. *Journal of Glaciology*, 65(254), 873–888. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.50>
- Medeu, A. R., Popov, N. V., Blagovechshenskiy, V. P., Askarova, M. A., Medeu, A. A., Ranova, S. U., Kamalbekova, A., & Bolch, T. (2022). Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan. *Earth-Science Reviews*, 229, Article 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muneeb, F., Baig, S. U., Khan, J. A., & Khokhar, M. F. (2021). Inventory and GLOF susceptibility of glacial lakes in Hunza River Basin, Western Karakorum. *Remote Sensing*, 13(9), Article 1794. <https://doi.org/10.3390/rs13091794>
- Mussina, A. K., Abdullayeva, A. S., Tursyngali, M. N., Nakonova, K. M., & Kairat, S. E. (2025). Ile Alatauynyn soltustik betkeiinin ortalyk zhane shygys boligindegi muzdyktyk-morenalyk kolderdin kenistik-uakyttyk ulestiriluini taldau [Analysis of the spatiotemporal distribution of moraine-glacial lakes in the central and eastern parts of the northern slope of the Ile Alatau]. *Geography and Water Resources*, (4), 57–74. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-4-57-74.46>
- Mussina, A., Raimbekova, Z., Shahgedanova, M., Barandun, M., Narbayeva, K., Abdullayeva, A., & Nyssanbayeva, A. (2023). Mountain resilience: A tool for mudflow risk management in the Ile Alatau Mountains, Kazakhstan. *Mountain Research and Development*, 43(1), D1–D10. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-22-00004>
- Mussina, A., Abdullayeva, A., Barandun, M., Ciccoira, A., & Tursyngali, M. (2024). 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*, 63, 19–24. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- Mussina, A., Tursyngali, M., Duskayev, K., Rodrigo-Illarri, J., Rodrigo-Clavero, M.-E., & Abdullayeva, A. (2025). Forecasting channel morphodynamics in the Ulken Almaty River (Ile Alatau, Kazakhstan). *Water*, 17(13), Article 2029. <https://doi.org/10.3390/w17132029>
- Perivolioti, T.-M., Apostolakis, A., Papadimos, D., & Tsiaoussi, V. (2025). Bathymetry and morphometric analysis of Greek natural lakes through a hybrid GIS-acoustic methodology. *Inland Waters*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/20442041.2024.2447173>
- Popov, N. V. (1987). Proryvnye glyatsial'nye seli i bor'ba s nimi v gorakh Severnogo Tyan'-Shanya [Outburst glacial debris flows and their mitigation in the mountains of the Northern Tien Shan]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, 59, 189–195.
- Popov, N. V. (1991). Assessment of glacial debris flow hazard in the north Tien-Shan. In *Proceedings of the Soviet-China-Japan Symposium and Field Workshop on Natural Disasters* (pp. 384–391).
- Popov, N. V., Ranova, S. U., Kamalbekova, A. N., Aldabergen, U. R., & Skorintseva, I. B. (2025). Analiticheskii obzor issledovaniy proryvnykh glyatsial'nykh selei v Kazakhstane [Analytical review of studies of outburst glacial debris flows in Kazakhstan]. *Geografiya i vodnye resursy*, (1), 125–139. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-125-139.12>
- Prakash, C., & Nagarajan, R. (2017). Glacial lake inventory and evolution in northwestern Indian Himalaya. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12), 5284–5294. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2767098>
- Shahgedanova, M., Saidaliyeva, Z., Mussina, A., Kapitsa, V., Raimbekova, Z., Donskikh, D., Kissebayev, D., Kasenov, M., & Petrov, M. (2024). Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: Regional database, meteorological triggers, and trends. *npj Natural Hazards*, 1, Article 49. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00050-7>
- Song, C., Fan, C., Ma, J., Zhan, P., & Deng, X. (2025). A spatially constrained remote sensing-based inventory of glacial lakes worldwide. *Scientific Data*, 12, Article 464. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04809-z>
- State Hydrological Institute. (2017). *STO GGI 52.08.40-2017. Opredelenie morfometricheskikh kharakteristik vodnykh ob'ektov sushi i ikh vodosborov s ispol'zovaniem tekhnologii geograficheskikh informatsionnykh sistem po tsifrovym kartam Rossiiskoi Federatsii i sputnikovym snimkam* [Determination of morphometric characteristics of inland water bodies and their catchments using geographic information system technology, digital maps of the Russian Federation, and satellite imagery]. RPTs Ofort.
- Sydyk, N. K., Iskalieva, G. M., Kaldybaev, A. A., Merekeev, A. A., Abishev, B. Zh., Amangeldi, A. A., & Sagat, M. S. (2025). *Otsenka sostoyaniya lednikov i morennykh ozer Ile Alatau* [Assessment of the state of glaciers and moraine lakes of the Ile Alatau]. Daryn.
- Vereshchagin, G. Yu. (1930). *Metody morfometricheskoi kharakteristiki ozer* [Methods for the morphometric characterization of lakes]. Trudy Olonetskoi nauchnoi ekspeditsii, Part 2, Issue 1.
- Wangchuk, S., & Bolch, T. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. *Science of Remote Sensing*, 2, Article 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>

Wu, R., Liu, G., Zhang, R., Wang, X., Li, Y., Zhang, B., Cai, J., & Xiang, W. (2020). A Deep Learning Method for Mapping Glacial Lakes from the Combined Use of Synthetic-Aperture Radar and Optical Satellite Images. *Remote Sensing*, 12(24), 4020. <https://doi.org/10.3390/rs12244020>.

Yin, L., Wang, X., Du, W., Yang, C., Wei, J., Wang, Q., Lei, D., & Xiao, J. (2024). Using the Improved YOLOv5-Seg Network and Sentinel-2 Imagery to Map Glacial Lakes in High Mountain Asia. *Remote Sensing*, 16(12), 2057. <https://doi.org/10.3390/rs16122057>

Авторлар туралы мәлімет:

Мусина Айнур Каировна – география ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: Aynur.Musina@kaznu.edu.kz).

Тұрсынғали Маржан Нұрланқызы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz).

Абдуллаева Әсел Сәбитқызы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының доцент м.а. (Алматы, Қазақстан, e-mail: Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz).

Оспанова Маржан Сансызбайқызы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының доцент м.а. (Алматы, Қазақстан, e-mail: Marzhan.Ospanova@kaznu.edu.kz).

Бексұлтанова Жансая Уразалиқызы – магистр, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: Zhansaya.Beksultanova@kaznu.edu.kz).

Ермаи Ербол Қамбарұлы – магистр, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті метеорология және гидрология кафедрасының PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: yermashyerbol@gmail.com).

Information about the authors:

Mussina, Aynur Kairovna – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Aynur.Musina@kaznu.edu.kz).

Tursyngali, Marzhan Nurlankyzy – PhD, Senior Lecturer at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz).

Abdullayeva, Assel Sabitkyzy – PhD, Acting Associate Professor at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz).

Ospanova, Marzhan Sansyzbaykyzy – PhD, Acting Associate Professor at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Marzhan.Ospanova@kaznu.edu.kz).

Beksultanova, Zhansaya Urazalikyzy – Master's degree, Senior Lecturer at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Zhansaya.Beksultanova@kaznu.edu.kz).

Yermash, Yerbol Kambaruly – Master's degree, PhD Candidate at the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: yermashyerbol@gmail.com).

Сведения об авторах:

Мусина Айнур Каировна – кандидат географических наук, ассоциированный профессор кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Aynur.Musina@kaznu.edu.kz).

Тұрсынғали Маржан Нұрланқызы – PhD, старший преподаватель кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Marzhan.Tursyngali@kaznu.edu.kz).

Абдуллаева Әсел Сәбитқызы – PhD, и. о. доцента кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Assel.Abdullayeva@kaznu.edu.kz).

Оспанова Маржан Сансызбайқызы – PhD, и. о. доцента кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Marzhan.Ospanova@kaznu.edu.kz).

Бексұлтанова Жансая Уразалиқызы – PhD, старший преподаватель кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Zhansaya.Beksultanova@kaznu.edu.kz).

Ермаи Ербол Қамбарұлы – магистр, PhD-докторант кафедры метеорологии и гидрологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: yermashyerbol@gmail.com).