



Научная статья

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ЛЕДНИКОВ И МОРЕННЫХ ОЗЕР В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТУРГЕН

Элима А. Амангелді*^{ID}, Гульнара М. Искалиева^{ID}, Айбек А. Мерекеев^{ID}, Мәдина С. Сағат^{ID}

ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан; amangeldialimma@gmail.com (ЭАА), igm.ionos@gmail.com (ГМИ), merekeev.aibek@gmail.com (ААМ), sagat.madina1@gmail.com (МСС)

*Автор корреспонденции: Элима А. Амангелді, amangeldialimma@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

изменение климата, площадь ледников, моренные озера, дистанционное зондирование Земли

АБСТРАКТ

В этой научной статье рассматриваются изменения, происходящие в зонах ледников и моренных озер, расположенных в бассейне реки Турген, с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Анализ спутниковых снимков (Landsat, Sentinel-2 и PlanetScope) за период с 1999 по 2024 годы показал значительное уменьшение ледового покрова, а также динамику образования моренных озер. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что, что площадь ледников в Тургенском бассейне уменьшилась на 50.3 %, с 34.8 км² в 1955 году до 17.3 км² в 2024 году. Также в бассейне реки наблюдается заметное увеличение площади моренных озер, что способствует повышенному риску наводнений в ледниковых озерах. Для оценки влияния климатических переменных использовались данные метеорологической станции Ассы, показывающие тенденцию повышения среднегодовой температуры в сочетании с уменьшением количества осадков. Результаты данного исследования подчеркивают необходимость постоянного мониторинга ледников и моренных озер, а также разработки стратегий, направленных на снижение рисков, связанных с их преобразованием.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ледники Центральной Азии играют ключевую роль в формировании водных ресурсов региона, однако в последние десятилетия они демонстрируют значительное сокращение площади и объема. Это сокращение сопровождается нарушениями водного баланса и обострением водных проблем в условиях усиливающегося климатического стресса. Недавние исследования подтверждают, что таяние ледников оказывает существенное влияние на гидрологический режим рек, изменяя доступность воды для населения, сельского хозяйства и экосистем [1...2]. Таким образом, деградация ледников рассматривается как один из наиболее чувствительных индикаторов текущих климатических изменений в регионе.

Изменения в криосфере, включая деградацию снежного покрова и вечной мерзлоты, могут служить индикаторами более широких трансформаций климатической системы Центральной Азии [3]. Подобные процессы усиливаются в условиях роста температур и снижения суммарного накопления твердых осадков в высокогорных районах.

Исторический анализ развития ледников показывает выраженные различия в их динамике, обусловленные климатической зональностью. Так, исследования указывают, что ледники во влажных и засушливых регионах развивались по-разному: в первом случае максимумы достигались в период морской кислородно-изотопной стадии 3...2 (около 30...15 тыс. лет назад), тогда как в аридных районах пик оледенения

По статье:

Получено: 22.09.2025

Пересмотрено: 04.10.2025

Принято: 05.10.2025

Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:

Амангелді Ә., Искалиева Г., Мерекеев А., Сағат М. Анализ изменений площади ледников и моренных озёр в бассейне реки Турген // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 47-57.

наблюдался значительно раньше – между стадиями 6 и 4 (около 190...60 тыс. лет назад) [4]. Данные различия в палеоклиматических условиях находят продолжение в современной пространственно-временной неоднородности баланса массы ледников, что напрямую отражается на сезонных и межгодовых колебаниях речного стока и доступности водных ресурсов [5].

Особенно выраженное сокращение ледников наблюдается в Северном Тянь-Шане, где за период с 1990 по 2015 год их площадь и объём значительно уменьшились. Такой факт подтверждается как дистанционными спутниковыми наблюдениями, так и результатами полевых исследований [6].

Одним из наиболее ощутимых последствий отступления ледников является ускоренное формирование моренных озёр. Ледники, наряду с таянием снега и атмосферными осадками, являются основным источником подпитки таких озёр, особенно в районах Иле Алатау. Рост числа и объёма моренно-подпрудных озёр повышает вероятность прорывных наводнений, представляющих угрозу для населения и инфраструктуры в долинах рек [7]. За последние десятилетия на территории Иле Алатау наблюдается активный рост числа и объёмов опасных озёр, что связано с деградацией оледенения и изменениями климатических условий [8]. Подобные тенденции прослеживаются и за пределами региона. Shan и др. сообщают, что на Гималайском плато наблюдается увеличение числа моренных озёр, из которых 301 озеро идентифицировано как потенциально опасное [9]. Аналогично, по данным других исследователей, отступление ледника Гепанг Гатх вызвало рост площади приледниковых озёр на 44%, что вызывает обеспокоенность по поводу безопасности населённых пунктов ниже по течению [10]. В работе документируется появление более 160 моренно-подпрудных озёр в юго-восточном Казахстане, многие из которых представляют потенциальную опасность из-за нестабильных ледово-моренных дамб [11].

Изменения площади ледников фиксируются с использованием повторных спутниковых снимков, что позволяет охватывать обширные и труднодоступные территории (WGMS, 2008). Анализ спутниковых данных свидетельствует о значительном уменьшении массы льда в ледниках, особенно в нижней части ледниковых языков, где наблюдается активное разрушение и таяние обломочного льда. Этот процесс продолжается с возрастающей интенсивностью на протяжении последних нескольких десятилетий [12...14].

Совокупность существующих исследований подчёркивает необходимость систематического мониторинга и разработки стратегий по снижению рисков, связанных с деградацией ледников и формированием моренных озёр. Природные явления, возникающие в результате переполнения таких озёр, представляют серьёзную угрозу для населения и объектов экономической инфраструктуры, особенно в горных районах Иле Алатау. В этом контексте особую значимость приобретает анализ рельефных изменений, связанных с таянием ледников, а также оценка их влияния на накопление воды в моренно-подпрудных озёрах.

Такие исследования имеют решающее значение для раннего выявления потенциальных очагов опасности и последующего прогноза природных катастроф, включая оползни, прорывные и внезапные наводнения, вызванные разрушением нестабильных моренных плотин.

В данной статье рассматриваются пространственно-временные изменения площади ледников и моренных озёр в бассейне реки Турген, выявленные на основе методов дистанционного зондирования Земли. Проведён анализ спутниковых данных за период с 1999 по 2024 год, позволивший оценить динамику ледниковых тел и связанных с ними озёрных систем в пределах данной высокогорной территории.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Область исследования

Ледники Иле Алатау представляют собой важный компонент региональной экосистемы, характеризующийся разнообразием форм, классификаций и пространственного распределения. Их морфологические и физико-географические характеристики оказывают прямое влияние на гидрологическую динамику речных бассейнов, обеспечивая устойчивое поступление водных ресурсов, необходимых как для нужд сельского хозяйства, так и для поддержания экологического баланса.

Территорией исследования является бассейн реки Турген, расположенный в Иле-Алатауском районе на юго-востоке Казахстана (Рисунок 1). Река Турген берёт начало на северных склонах хребта Иле Алатау и питается главным образом за счёт таяния ледников, сезонного снежного покрова и атмосферных осадков.

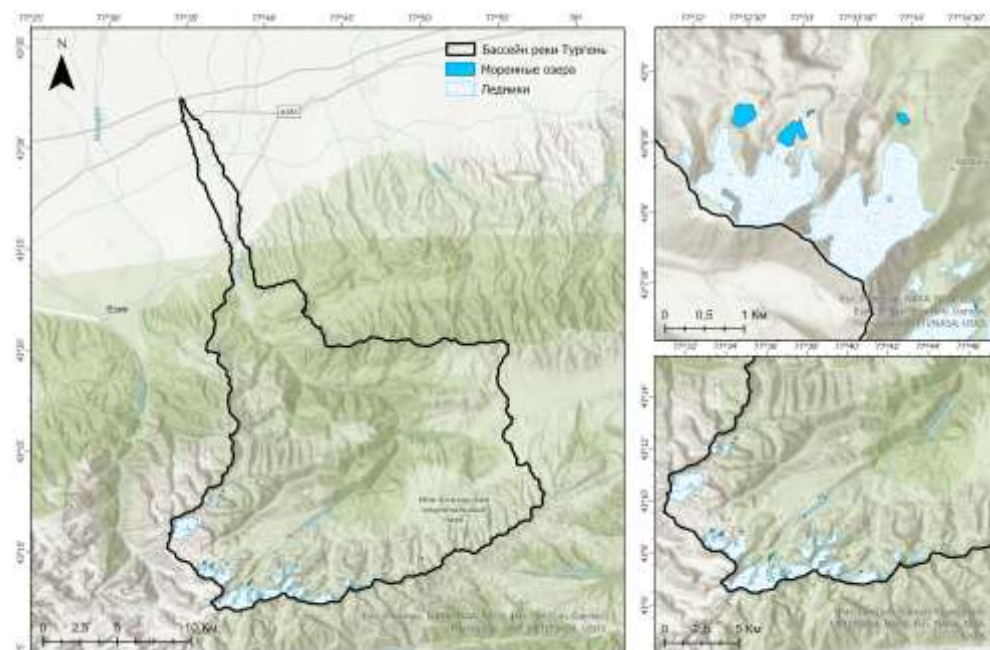


Рисунок 1. Бассейн реки Турген

В пределах бассейна сосредоточены значительные ледниковые массивы, которые играют ключевую роль в формировании стока, особенно в периоды весенне-летнего таяния. Таким образом, ледники Тургенского бассейна выступают как важный регулятор водоснабжения региона, обеспечивая стабильность речного стока в условиях климатической изменчивости

Данные

Для анализа текущего состояния ледников и изучения их изменений были использованы спутниковые снимки с платформ Landsat 7-8, Sentinel-2 и PlanetScope. Снимки, полученные в конце периода абляции (август-сентябрь), когда снежный покров минимален, обеспечивают наиболее точное выявление границ ледников и моренных озёр. На основе этих данных была проведена оценка динамики ледниковых систем и водных объектов за период с 1999 по 2024 год.

В исследовании применялся метод спектрального соотношения полос Landsat ETM+ и Landsat OLI, рекомендованный F. Paul [15,16]. Этот подход основан на расчёте индексов, таких как Band 3 / Band 5 для Landsat ETM+, Band 4 / Band 6 для Landsat OLI, а также Band 4 / Band 11 для Sentinel-2. Использование разных комбинаций спектральных каналов позволило повысить точность автоматического выделения ледников на многолетнем временном ряду.

Для анализа моренных озёр были привлечены данные с различных спутниковых платформ, в том числе Sentinel-2, что обеспечило детальный и непрерывный временной охват. В ходе сравнения методов извлечения водных объектов – таких как

NDWI, MNDWI, AWEI и метод пороговых значений по NIR – было установлено, что нормализованный разностный водный индекс (NDWI) демонстрирует наибольшую точность для различных типов водоёмов. Однако следует учитывать, что эффективность того или иного метода может варьироваться в зависимости от природных условий конкретной территории [17].

Идентификация и картографирование ледниково-моренных озёр в исследуемом регионе осуществлялись в два этапа: сначала выполнялась сегментация спутниковых изображений, затем проводилась ручная верификация и оцифровка полученных контуров.

Для комплексного понимания процессов, влияющих на сокращение площади ледников и рост площади озёр, дополнительно были проанализированы климатические параметры. В качестве основного источника климатических данных использовались многолетние наблюдения, зарегистрированные на метеостанции Ассы, обеспечивающие репрезентативность климатической характеристики региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современное состояние и эволюция ледников

В ходе исследования была определена скорость отступления ледников, количественно оценены масштабы этого сокращения, а также выявлены основные факторы, влияющие на изменения. Как показано в таблицах 1 и 2, ледники в исследуемом районе демонстрируют отрицательную динамику.

Таблица 1

Изменения количества и площади ледников

Год	1955	1999	2014	2021	2024
площадь, км ²	34.8	24.7	19.5	18.9	17.3
количество	30	25	22	22	21
Сокращение					
Период	1955...1999	1955...2021	1999...2014	1999...2021	2014...2021
Сокращение площади, %	-28.9 %	-45.7 %	-21.3 %	-23.6 %	-2.9 %
Скорость сокращения в год, %	-0.7 %	-0.7 %	-1.4 %	-1.1 %	-0.4 %

Согласно данным, приведённым в таблице 1, ледники региона значительно уменьшили свою площадь за последние десятилетия. В 1955 году по данным каталога СССР, общая площадь ледников в бассейне составляла 34.8 км², включая 30 ледников. К 2024 году эта площадь сократилась до 17.3 км², что соответствует уменьшению на 50.3 % по сравнению с первоначальными данными.

Таблица 2

Изменения площади 4 ледников в бассейне Тургеня

Название ледника согласно схеме (каталог СССР 1955 г.)	Морфологический тип ледника	Площадь открытой части ледника, км ²		
		1955	2014	2024
№227	шлейфовый	2.8	2.07	1.9
№231	Простой долинный	2.1	1.52	1.45
№234 Горного Института	котловинный	9.4	6.2	5.85
№241 Гляциологов	шлейфовый	3.2	1.9	1.53

Изучение темпов уменьшения площади ледников показывает, что с 1955 по 1999 год среднегодовая скорость сокращения составила 0.7 %, и площадь ледников уменьшилась на 28.9 %. В более поздний период, с 1999 по 2014 год, темпы усадки увеличились до 1.4 % в год, что привело к сокращению площади на 21.3 %. Однако,

начиная с 2014 года, темпы деградации ледников начали замедляться: с 2014 по 2021 год площадь уменьшилась всего на 2.9 %, а среднегодовая скорость сокращения снизилась до 0.4 %.

Для более детального анализа динамики ледников в бассейне Турген приведены данные в таблице 2. Ледник № 227 в 1955 году занимал площадь 2.8 км², но к 2024 году его площадь сократилась до 1.9 км². Ледник № 234, принадлежащий Горному институту, также показал значительное сокращение: его площадь уменьшилась с 9.4 км² в 1955 году до 5.85 км² в 2024 году.

Эти результаты подтверждают тенденцию резкого сокращения ледников в исследуемом регионе, что связано с изменениями климатических условий, а также с процессами глобального потепления.

Динамика формирования и изменений моренных озёр или Моренные озера: формирование, изменение и потенциальные риски

После завершения процесса картографирования каждое ледниково-моренное озеро было отнесено к необходимым характеристикам для составления кадастра и оценки его текущего состояния, а также для анализа временных колебаний, наблюдаемых в ледниково-моренных озёрах, расположенных в центральных и восточных районах северного склона Иле Алатау. В качестве атрибутов были указаны: обозначение озера, географические координаты (широта и долгота), высота (в метрах над уровнем моря) и площадь поверхности озера, как показано в таблице 3.

Таблица 3

Изменения площади и количества моренных озёр

Год	Площадь, м ²	Количество	Новые озера
Паспортизированные в 2017*	495 825.2	32	
2024 (Sentinel-2)	512 792.8	31	7
2024 (PlanetScope)	458 321.3	31	8

Примечание: *Данные получены от ГУ «Казселесзащита» МЧС

Анализ данных спутников Sentinel-2 и PlanetScope показал заметные изменения в площади и количестве моренных озёр. В 2017 году общая площадь озёр составила 495 825.2 м², при этом было зарегистрировано 32 озера. По данным Sentinel-2, к 2024 году площадь увеличилась до 512 792.8 м², но количество озёр уменьшилось до 31, хотя появилось 7 новых озёр. В то же время, согласно данным PlanetScope, площадь моренных озёр составила 458 321.3 м², при неизменном числе озёр (31), но с добавлением 8 новых озёр.

Кроме того, задокументированы случаи осушения некоторых моренных озёр, что, вероятно, связано с ухудшением состояния ледникового покрова и изменениями в региональном гидрологическом режиме. В бассейне реки Турген проводится активный сброс воды из крупных моренных озёр для снижения рисков прорывов и последующих наводнений.

Регресс ледников и его влияние на формирование озёр

Одним из последствий деградации ледников и изменения криосферы является формирование и трансформация ледниково-моренных озёр. По данным, приведённым в таблице 3, сокращение площади ледников в сочетании с деградацией вечной мерзлоты способствует формированию новых моренных озёр. Эти водоёмы возникают в зонах интенсивного таяния ледников, где моренные отложения играют роль естественных плотин, препятствующих свободному оттоку талой воды. Увеличение количества и площади моренных озёр может привести к существенному росту риска прорывных паводков, особенно в уязвимых горных районах. Эти изменения оказывают заметное влияние на гидрологическую динамику речных систем, включая

сезонное перераспределение стока, повышение вероятности внезапных паводков и усиление давления на водохозяйственную инфраструктуру.

Визуальное представление различных типов ледниковых озёр и используемых в данном исследовании данных приведено на рисунке 2. На схеме зелёным цветом обозначены данные, применяемые для анализа эволюции ледников; параметр « dh/dt » указывает на скорость изменения толщины ледяного покрова. Синим цветом показаны ледниковые озёра, а красные и оранжевые стрелки иллюстрируют направления их развития. Пунктирные линии обозначают возможные пути стока из озёр, а аббревиатура «GLOF» указывает на прорыв ледникового озера (Glacial Lake Outburst Flood) [18].

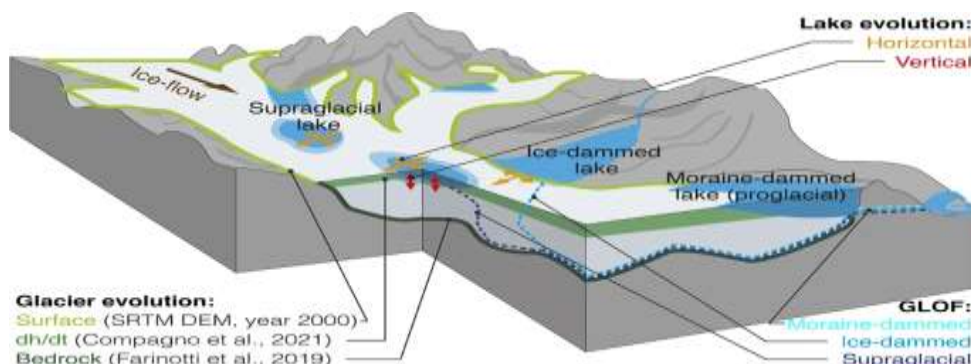


Рисунок 2. Схематический обзор различных типов ледниковых озёр и входные данные [18]

Анализ данных метеостанций: температура, осадки и их тенденции

Глобальные изменения климата оказывают существенное влияние на ледниковые системы, что обуславливает актуальность их исследования. Одним из ключевых факторов является повышение температур, особенно в летние месяцы, которое приводит к активному таянию ледников. Это, в свою очередь, увеличивает объем талой воды, поступающей в моренные озера, и способствует росту уровня воды в реках.

Анализ температурных и осадочных условий на территории бассейна реки Турген проведен на основе данных метеорологической станции Ассы, предоставленных Республиканским гидрометеорологическим фондом РГП «Казгидромет», за период с 1961 по 2022 год (рисунок 3). Формулировка и представление выводов на основе полученных результатов; сопоставление полученных результатов с уже имеющимися результатами по данной тематике; оценка практической ценности полученных результатов.

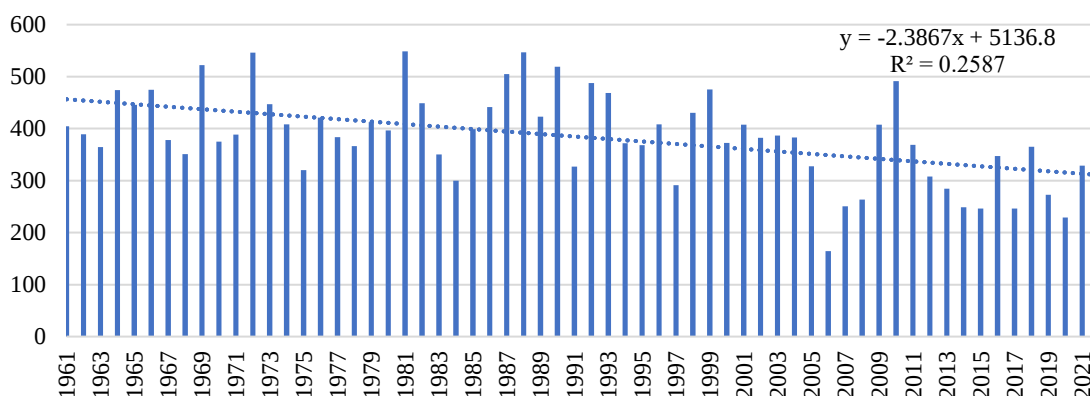


Рисунок 3. Годовая сумма осадков (1961...2022 гг.) на территорию бассейна Турген

Снижение количества осадков за исследуемый период (1961...2022 гг.) подтверждается отрицательным углом наклона трендовой линии (-2.3867), что указывает на тенденцию к уменьшению годовых сумм осадков. Коэффициент детерминации $R^2=0.2587$ свидетельствует о слабой степени объяснённости вариаций осадков линейной моделью тренда. Значение R^2 ниже общепринятого уровня статистической значимости (обычно 0.95 или 95 % доверительный уровень), что указывает на наличие других факторов, влияющих на распределение осадков, помимо линейного тренда [19].

На рисунке 4 прослеживается устойчивая тенденция к повышению как годовой, так и летней температуры. Угловые коэффициенты трендовых линий положительны и составляют 0.0145 для летнего периода и 0.0141 для годового, что указывает на стабильный рост температурных показателей.

Полученные на метеостанции Асса данные подтверждают влияние климатических изменений на региональные атмосферные условия. Зафиксированное повышение температуры оказывает непосредственное воздействие на ледниковые системы, ускоряя процессы их абляции.

Одним из последствий этих процессов является активное формирование новых моренных озёр. В частности, в бассейне реки Турген зафиксировано появление семи новых водоёмов, сформировавшихся в областях с интенсивным таянием льда. В подобных районах моренные отложения выполняют роль естественных преград, способствующих удержанию талой воды и образованию устойчивых озёрных структур.

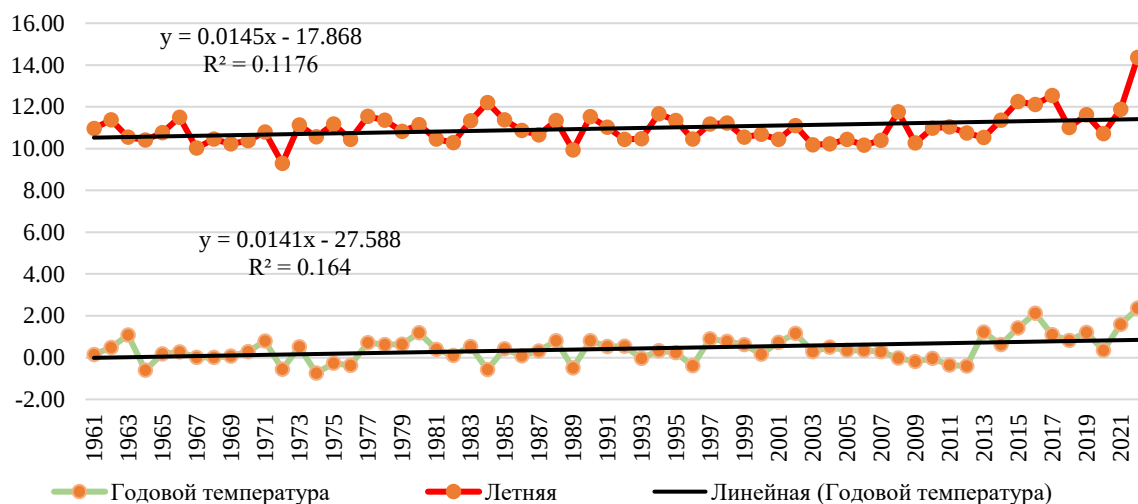


Рисунок 4. Годовая и летняя (июнь-август) температура на территорию Турген

Увеличение площади и числа моренных озёр отражает активное развитие гляциальных процессов, происходящих на северных склонах Иле Алатау. В условиях продолжающегося потепления климатической системы возможно, как расширение уже существующих озёр, так и формирование новых водоёмов. Эти изменения существенно повышают вероятность прорывов моренных озёр, что несёт потенциальную угрозу катастрофических паводков и может вызвать значительные трансформации в гидрологическом режиме горных речных бассейнов.

Современные климатические изменения оказывают существенное влияние на ледниковые системы Центральной Азии, вызывая их стремительное сокращение. Это оказывает глубокое воздействие на гидрологическую динамику региона и способствует формированию новых водных объектов. В Иле-Алатауском регионе Казахстана фиксируется заметный рост как количества, так и площади моренно-

ледниковых озёр, что напрямую связано с деградацией ледников и активным таянием вечной мерзлоты [9...19].

Согласно данным многолетних наблюдений, количество таких озёр увеличилось с 20 в 1978 году до 77 в 2021 году, в то время как на юго-востоке Казахстана общее число ледниково-моренных водоёмов превысило 160 к 2018 году. Указанные трансформации сопровождаются усилением природных рисков, включая вероятность катастрофических наводнений, вызванных прорывами озёр, а также формированием селевых потоков, представляющих угрозу как для объектов инфраструктуры, так и для населения в горных районах [11].

Сокращение ледниковых тел оказывает прямое влияние на гидрологическое равновесие региона. По прогнозам, процесс дегляциации в Казахстане будет ускоряться вплоть до середины XXI века. Прогнозируемое уменьшение объёмов ледников может составить от 38 % до 50 %, а сокращение площади – от 34 % до 39 %. Эти изменения, в свою очередь, приведут к перераспределению речного стока: при сниженной степени оледенения предполагается уменьшение летнего стока, тогда как в районах с высокой долей ледников возможно усиление весеннего паводка.

Анализ ретроспективных данных за период с 1955 по 2015 год подтверждает эти тенденции: за указанный промежуток времени площадь ледников в Казахстане сократилась на 40.8 %, а их объём – на 42.5 % [21]. В региональном масштабе, по оценкам, площадь ледников Центральной Азии за последние 45 лет уменьшилась на 16...27 %, что обусловлено повышением летних температур и изменением характера осадков. Такие климатические сдвиги оказывают не только влияние на режим речного питания, но и способствуют формированию потенциально опасных озёр, связанных с ледниковой динамикой [22].

Особую важность приобретает воздействие климатических изменений на экосистемы горных и равнинных территорий Центральной Азии. Изменение объёмов талой воды и динамики криосферы оказывает существенное влияние на деградацию вечной мерзлоты и приводит к трансформациям в биоразнообразии, нарушая устойчивость природных систем.

Дополнительную угрозу представляет ускорение движения скальных ледников, наблюдаемое в пределах Иле Алатау и Кунгёй Ала-Тоо. Этот процесс свидетельствует об активизации осадочных потоков, что значительно повышает вероятность возникновения селевых процессов и оползневых образований в зоне активного горного рельефа.

Масштабы изменений в ледниковых массивах и их влияние на водные системы требуют комплексного научного подхода. Для эффективного мониторинга и управления рисками необходимо активное применение технологий дистанционного зондирования, моделирования гидрологических процессов и регулярных полевых исследований. Такие меры позволят не только своевременно оценить последствия дегляциации, но и разработать стратегии адаптации, направленные на устойчивое управление природными ресурсами в условиях изменяющегося климата.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные факторы, способствующие сокращению ледников, вероятно, связаны с изменением климата, включая повышение среднегодовой температуры и уменьшение осадков в зоне пополнения ледников. Несмотря на повсеместное сокращение ледников, недавнее замедление их деградации требует дополнительных исследований для более точной оценки воздействия метеорологических переменных на динамику ледников.

Повышение средней температуры и увеличение частоты экстремальных метеорологических явлений существенно усиливают процессы деградации ледников. Эмпирические данные спутниковых наблюдений и гляциологические исследования

подтверждают, что в бассейне реки Турген наблюдается постоянное сокращение площади и массы ледников, что ведет к увеличению притока талых вод в речную систему.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из РГП «Казгидромет» МЭП РК.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ЭАА; управление данными - ААМ, МСС; формальный анализ - ГМИ, МСС; методология - ЭАА, МСС; программное обеспечение - ААМ; отслеживание - ЭАА; визуализация - ААМ; написание исходного проекта - ЭАА; написание и редактирование обзора - ЭАА, ГМИ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа сделана в рамках проекта, который финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21882365).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Xu M., Wang P., Wu H., Kang S. (2023). Different patterns of changes in glacier mass balance and glacier runoff over the Tarim Basin, Central Asia. *Hydrological Processes*, 37(10), e14997. <https://doi.org/10.1002/hyp.14997>
- 2 Denzinger F., Machgut, H., Barandun M., Berthier E., Girod L., Kronenberg M., Usabaliev R., Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. *Journal of Glaciology*, 67(262), 331-342. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.108>
- 3 Barandun M., Fiddes J., Scherler M., Mathys T., Saks T., Petrakov D., Hoelzle M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. *Water Security*, 11, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.10007>
- 4 Batbaatar J., Gillespie A. R., Koppes M., Clark D. H., Chadwick O. A., Fink D., Matmon A., Rupper S. (2021). Glacier development in continental climate regions of central Asia. [https://doi.org/10.1130/2020.2548\(07\)](https://doi.org/10.1130/2020.2548(07))
- 5 Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725-731. <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>
- 6 Zhang Q., Chen Y., Li Z., Xiang Y., Li Y., Sun C. (2022). Recent changes in glaciers in the northern tien Shan, central Asia. *Remote Sensing*, 14(12), 2878. <https://doi.org/10.3390/rs14122878>
- 7 Попов Н. В., Ранова С. У., Камалбекова А. Н., Алдабергген Ү. Р. Количественная оценка гляциальной селевой опасности в Иле Алатау // География и водные ресурсы. – 2024. - № (4). – С. 115-129.
- 8 Татъкова М. Е., Северский И. В., Усманова З. С., Капица В. П. Тестирование возможностей методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем // География и водные ресурсы. – 2024. - №(3). – С. 68-83.
- 9 Shan Z., Li Z., Dong X. (2021). Impact of glacier changes in the Himalayan Plateau disaster. *Ecological Informatics*, 63, 101316. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101316>
- 10 Kumar V., Mehta M., Shukla T. (2021). Spatially resolved estimates of glacial retreat and lake changes from Gepang Gath Glacier, Chandra Basin, Western Himalaya, India. *Journal of the Geological Society of India*, 97(5), 520-526. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1718-y>
- 11 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, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
- 12 Bolch, T., Pieczonka T., Benn D. I. (2011). Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *The Cryosphere*, 5(2), 349-358. <https://doi.org/10.5194/tc-5-349-2011>
- 13 Kääb A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., Arnaud Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488(7412), 495-498. <https://doi.org/10.1038/nature11324>
- 14 Brun F., Wagnon P., Berthier E., Jomelli V., Maharjan S. B., Shrestha F., Kraaijenbrink P. D. A. (2019). Heterogeneous influence of glacier morphology on the mass balance variability in High Mountain Asia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(6), 1331-1345. <https://doi.org/10.1029/2018JF004838>
- 15 Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34, 355-361. <https://doi.org/10.3189/172756402781817941>
- 16 Paul F., Barrand N. E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Joshi S. P., Konovalov V., Winsvold S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171-182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- 17 Yue H., Li Y., Qian J., Liu Y. (2020). A new accuracy evaluation method for water body extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 41(19), 7311-7342. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1755740>
- 18 Compagno L., Huss M., Zekollari H., Miles E. S., Farinotti D. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 191. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8>
- 19 Lafon T., Dadson S., Buys G., Prudhomme C. (2013). Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. *International journal of climatology*, 33(6), 1367-1381. <https://doi.org/10.1002/joc.3518>
- 20 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*. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- 21 Вилесов Е. Н. Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.) // Лёд и Снег. – 2018. - №58(2). - С. 159-170. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170>
- 22 Merekeyev A. A., Iskaliyeva G. M., Gaipova A. B., Amangeldi A. A., Sagat M. S., Sydyk N. K. (2025). Methods of monitoring moraine lakes in Central Asia under climate change. *Izdenister natigeler*, 2 (106), 469-480.

REFERENCES

- 1 Xu M., Wang P., Wu H., Kang S. (2023). Different patterns of changes in glacier mass balance and glacier runoff over the Tarim Basin, Central Asia. *Hydrological Processes*, 37(10), e14997. <https://doi.org/10.1002/hyp.14997>
- 2 Denzinger F., Machgut, H., Barandun M., Berthier E., Girod L., Kronenberg M., Usabaliev R., Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. *Journal of Glaciology*, 67(262), 331-342. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.108>
- 3 Barandun M., Fiddes J., Scherler M., Mathys T., Saks T., Petrakov D., Hoelzle M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. *Water Security*, 11, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.10007>
- 4 Batbaatar J., Gillespie A. R., Koppes M., Clark D. H., Chadwick O. A., Fink D., Matmon A., Rupper S. (2021). Glacier development in continental climate regions of central Asia. [https://doi.org/10.1130/2020.2548\(07\)](https://doi.org/10.1130/2020.2548(07))
- 5 Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725-731. <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>
- 6 Zhang Q., Chen Y., Li Z., Xiang Y., Li Y., Sun C. (2022). Recent changes in glaciers in the northern tien Shan, central Asia. *Remote Sensing*, 14(12), 2878. <https://doi.org/10.3390/rs14122878>
- 7 Popov N.V., Ranova S.U., Kamalbekova A.N., Aldabergen U.R. (2024). Kolichestvennaya ocenka glyacial'noj selevoj opasnosti v Ile Alatau [Quantitative assessment of glacial debris flow hazard in the Ili Alatau]. *Geografiya i vodnye resursy*, (4), 115-129. [in Russian]
- 8 Ta'kova M. E., Severskiy I. V., Usmanova Z. S., Kapica V. P. (2024). Testirovanie vozmozhnostej metodiki operativnogo monitoringa gorno-lednikovyh sistem [Testing the capabilities of the methodology for operational monitoring of mountain glacier systems]. *Geografiya i vodnye resursy*, (3), 68-83 [in Russian]
- 9 Shan Z., Li Z., Dong X. (2021). Impact of glacier changes in the Himalayan Plateau disaster. *Ecological Informatics*, 63, 101316. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101316>
- 10 Kumar V., Mehta M., Shukla T. (2021). Spatially resolved estimates of glacial retreat and lake changes from Gepang Gath Glacier, Chandra Basin, Western Himalaya, India. *Journal of the Geological Society of India*, 97(5), 520-526. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1718-y>
- 11 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, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
- 12 Bolch, T., Pieczonka T., Benn D. I. (2011). Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *The Cryosphere*, 5(2), 349-358. <https://doi.org/10.5194/tc-5-349-2011>
- 13 Kääb A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., Arnaud Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488(7412), 495-498. <https://doi.org/10.1038/nature11324>
- 14 Brun F., Wagnon P., Berthier E., Jomelli V., Maharjan S. B., Shrestha F., Kraaijenbrink P. D. A. (2019). Heterogeneous influence of glacier morphology on the mass balance variability in High Mountain Asia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(6), 1331-1345. <https://doi.org/10.1029/2018JF004838>
- 15 Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34, 355-361. <https://doi.org/10.3189/172756402781817941>
- 16 Paul F., Barrand N. E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Joshi S.P., Kononov V., Winsvold S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171-182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- 17 Yue H., Li Y., Qian J., Liu Y. (2020). A new accuracy evaluation method for water body extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 41(19), 7311-7342. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1755740>
- 18 Compagno L., Huss M., Zekollari H., Miles E. S., Farinotti D. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 191. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8>
- 19 Lafon T., Dadson S., Buys G., Prudhomme C. (2013). Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. *International journal of climatology*, 33(6), 1367-1381. <https://doi.org/10.1002/joc.3518>
- 20 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*. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786>
- 21 Vilesov, E. N. (2018). Izmenenie razmerov i sostoyaniya lednikov Kazakhstana za 60 let (1955–2015 gg.) [Changes in the size and condition of Kazakhstan's glaciers over 60 years (1955–2015)]. *Lyod i Sneg*, 58(2), 159-170. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170> [in Russian]
- 22 Merekeyev A.A., Iskaliyeva G.M., Gaipova A.B., Amangeldi A.A., Sagat M.S., Sydyk N.K. (2025). Methods of monitoring moraine lakes in Central Asia under climate change. *Izdenister natigeler*, 2 (106)), 469-480.

ТҮРГЕН ӨЗЕНІ БАССЕЙНІНДЕГІ МҰЗДЫҚТАР МЕН МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕР АУДАНЫНЫҢ ӨЗГЕРУІН ТАЛДАУ

Әлима А. Амангелді*, Гульнара М. Искалиева, Айбек А. Мерекеев, Мәдина С. Сағат

«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы, Казахстан; amangeldialimma@gmail.com, igm.ionos@gmail.com,
merekeev.aibek@gmail.com, sagat.madina1@gmail.com

*Автор корреспонденция: Әлима А. Амангелді, amangeldialimma@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

климаттың өзгеруі,
мұздықтар ауданы,
мореналық көлдер,
Жерді қашықтықтан зондтау

Мақала жайында:

Жіберілді: 22.09.2025

Қайта қаралды: 04.10.2025

Қабылданды: 05.10.2025

Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Бұл ғылыми мақалада Түрген өзенінің бассейнінде орналасқан мұздықтар мен морендалық көлдер аймақтарында болып жатқан өзгерістер Жерді қашықтықтан зондтау (ЖҚЗ) әдістерін қолдану арқылы қарастырылады. 1999...2024 жылдар аралығындағы Landsat, Sentinel-2 және PlanetScope спутниктік деректерін талдау мұздық жамылғысының айтарлықтай азайғанын және мореналық көлдердің қалыптасу динамикасын көрсетті. Эмпирикалық деректер Түрген бассейніндегі мұздықтар ауданы 1955 жылы 34.8 км² болған болса, 2024 жылы 17.3 км²-ге дейін азайып, 50.3 % қысқарғанын көрсетеді. Сонымен қатар, бассейнде морендік көлдердің ауданының айтарлықтай ұлғайғаны байқалады, бұл мұздық көлдердің тасыма қаупінің (GLOF) артуына ықпал етеді. Климаттық айналымылардың әсерін бағалау үшін Ассы метеостанциясының деректері қолданылып, жылдық орташа температураның жоғарылау және жауын-шашын мөлшерінің азаю үрдісі анықталды. Зерттеу нәтижелері мұздықтар мен мореналық көлдерді үнемі бақылаудың маңыздылығын, сондай-ақ олардың трансформациясымен байланысты қауіп-қатерлерді азайтуға бағытталған стратегияларды әзірлеу қажеттігін көрсетеді.

ANALYSIS OF GLACIER AND MORaine LAKE AREA CHANGES IN THE TURGEN RIVER BASIN

Alima Amangeldi*, Gulnara Iskaliyeva, Aibek Merekeyev, Madina Sagat

LLP «Institute of Ionosphere», Almaty, Kazakhstan; amangeldialimma@gmail.com, igm.ionos@gmail.com,
merekeev.aibek@gmail.com, sagat.madina1@gmail.com

*Corresponding author: Alima Amangeldi, amangeldialimma@gmail.com

KEY WORDS

climate change,
glacier area,
moraine lakes,
remote sensing

About article:

Received: 22.09.2025

Revised: 04.10.2025

Accepted: 05.10.2025

Published: 08.10.2025

ABSTRACT

This scientific paper examines the changes occurring in glacier zones and moraine lakes located in the Turgan River basin using remote sensing (RS) methods. Analysis of satellite imagery (Landsat, Sentinel-2, and PlanetScope) from 1999 to 2024 revealed a significant reduction in glacier cover as well as the dynamics of moraine lake formation. Empirical data show that the glacier area in the Turgan basin has decreased by 50.3 %, from 34.8 km² in 1955 to 17.3 km² in 2024. In addition, a noticeable increase in the area of moraine lakes has been observed, which contributes to a heightened risk of glacier lake outburst floods (GLOFs). To assess the impact of climatic variables, data from the Assy meteorological station were used, showing a trend of increasing average annual temperature combined with a decrease in precipitation. The results of this study highlight the need for continuous monitoring of glaciers and moraine lakes, as well as the development of strategies aimed at reducing the risks associated with their transformation.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).