

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-65-73>

УДК 550.34.098: 551.324.63

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МИРОВЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕДНИКАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Н. Н. Михайлова\*, А. С. Мукамбаев, Е. Н. Казаков, В. Г. Морозов, У. А. Игибаев

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

\* E-mail для контактов: mikhailova@kndc.kz

Глобальное изменение климата влияет практически на все сферы человеческой деятельности и мировой экосистемы в целом. Рост температуры, в частности, приводит к ускорению таяния ледников, что в свою очередь приводит к изменению расхода рек, имеющих ледниковое питание. Это явление неизбежно оказывает влияние на жизнедеятельность населенных пунктов, использующих воду этих рек.

Сейсмические и инфразвуковые станции мониторинговой сети НЯЦ на протяжении многих лет регистрируют колебания земли и воздуха. Накопленная база данных инструментальных наблюдений содержит информацию об изменениях климата в предыдущие десятилетия, такую, например, как частота и пространственное распределение ледниковых землетрясений.

В этой связи предлагается провести анализ изменений режима деструкции ледников, основанный на изучении сейсмических и инфразвуковых данных, полученных за последние два десятилетия казахстанской мониторинговой сетью и изучить связь найденных закономерностей с глобальными изменениями климата.

В настоящей статье описываются современные представления о влиянии климата на горные ледники, общие сведения об изменении размеров и состояния ледников Казахстана. Рассматривается возможность применения криосейсмологии как нового инструмента изучения динамики изменения ледников. В заключении статьи приводятся результаты изучения динамики ледников сейсмическими методами в зоне Тянь-Шаня по литературным данным.

**Ключевые слова:** сейсмология, климат, ледники, криосейсмология, ледниковые землетрясения, суточные вариации.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с большим интересом к проблемам глобального потепления началось активное изучение ледников как в арктической зоне, так и в горных районах на континентах. Сейчас уже неопровержимо доказано, что средняя глобальная температура воздуха постоянно растет. На рисунке 1 [1] показано, как на протяжении почти 150 лет возрастает температура воздуха. В августе 2023 г. по сравнению с августом 1880 г. этот прирост составил 2,53 °С.

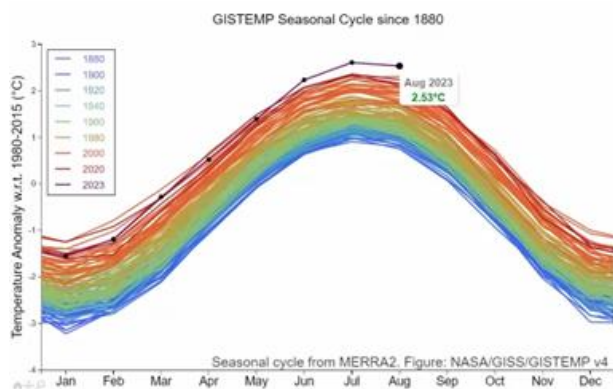


Рисунок 1. Изменение средней глобальной температуры воздуха (январь-декабрь) с 1880 по 2022 гг. [1]

В связи с изменениями температуры происходят различные явления в уровне океанов, в изменении баланса массы ледников. Различными исследованиями в разных регионах мира установлено, что баланс массы ледников был наиболее негативным в южных Андах, европейских Андах, Пиренеях, на Кавказе и наименее негативным в высокогорной Азии при значительных различиях внутри регионов. [2, 3]. На рисунках 2 и 3 представлена картина роста концентрации  $\text{CO}_2$  по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Мауна Лоа ежемесячно за 2019–2023 гг. и за 60 лет. Четко видно, что происходит постоянный рост  $\text{CO}_2$  с вариациями содержания в течение года.

По данным ледниковых кернов есть уникальная картинка изменения температуры и содержания  $\text{CO}_2$  за последние 800 тысяч лет. На рисунке 4 из [4] представлены колебания температуры воздуха и углекислого газа в атмосфере. Видно, что два этих параметра меняются согласованно. Последняя точка (звездочка) показывает содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере в настоящее время (2023 г.). Снизить эмиссию парниковых газов человечеству пока не удается.

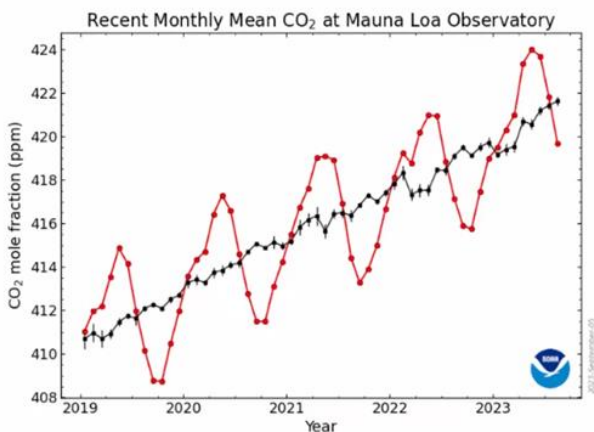


Рисунок 2. Рост концентрации CO<sub>2</sub> по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Мауна Лоа в последние годы

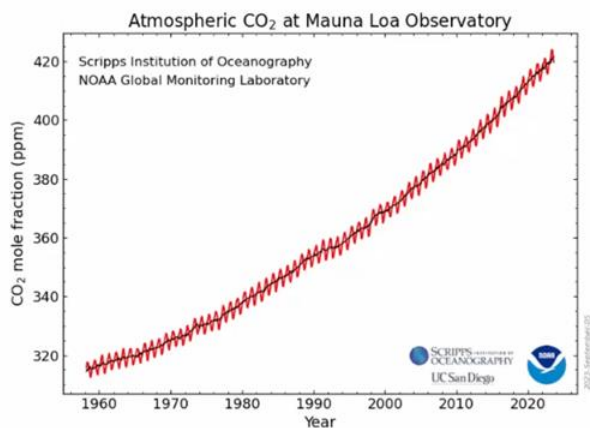


Рисунок 3. Долговременные изменения концентрации CO<sub>2</sub> по данным инструментальных наблюдений на обсерватории Мауна Лоа

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Современные представления о влиянии климата на горные ледники

Современное сокращение ледников наблюдается во всем мире. Баланс массы ледников зависит не только от температуры, но и от зимних осадков [4]. Были такие периоды, когда размеры ледников вдруг увеличивались. Но сейчас, надо признать, темпера-

турное влияние превосходит влияние осадков. Мировой прогноз состоит в том, что температура воздуха в горных районах продолжит повышаться в среднем на 0,3 °C за десятилетие.

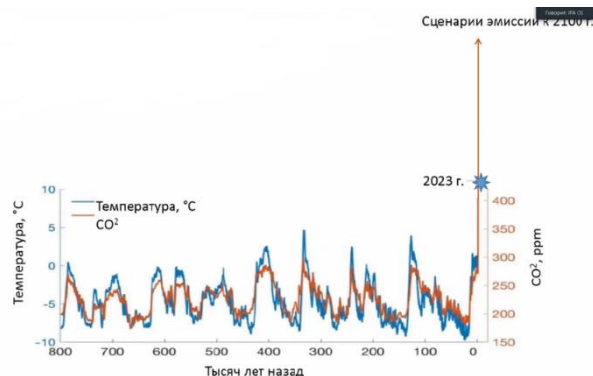


Рисунок 4. Колебания температуры воздуха и углекислого газа в атмосфере по данным ледниковых кернов за последние 800 тыс. лет [4]

Небольшие ледники, например, в Европе и Восточной Африке, тропических Андах к 2100 г. потеряют более 80% своей нынешней массы. Потеря массы ледников и ледниковых покровов зависит от сценария выброса CO<sub>2</sub>: при неблагоприятном сценарии вклад за счет таяния Гренландии и Антарктиды в прирост уровня океана составит к концу XXI века 56 см.

При разных моделях поведения человечества прогнозируется, что к концу XXI века ледники Российской Арктики потеряют от 25 до 50% массы, а оледенение горных ледников сократится на 50–80% (рисунок 5) [5]. Есть «агрессивные сценарии» (красные линии) и более лояльные (черные).

Влияние изменения климата на криосферу происходит в различных направлениях. Выделяются следующие следствия воздействия: уменьшение площади, объема и мощности залегания, меньший водозпас в межсезонье. По мере сокращения ледника вода речного стока будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, то есть изменение происходит нелинейно. По расчетам исследователей вклад в общий сток рек высокогорной Азии составляет: снег – около 2/3, ледники – 4–12%.

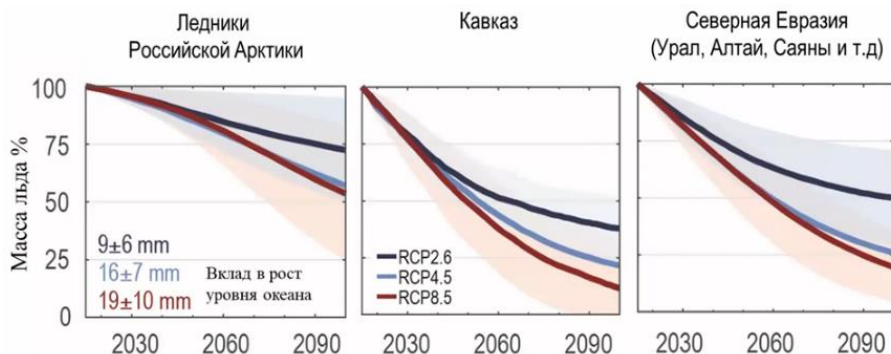


Рисунок 5. Прогноз эволюции ледников в России [5]

В России создан и постоянно обновляется каталог ледников России по спутниковым данным <https://www.glacru.ru>. Анализ сведений по изучению ледников показывает, что в настоящее время основные методы изучения ледников – это мониторинг по космоснимкам, инструментальные методы измерения толщины льда георадаром, бурение и изучение ледовых кернов, палеоэкологические реконструкции и различные геофизические методы.

Таким образом:

- продолжающееся потепление климата приводит к усиленному таянию ледников по всему Земному шару;
- исчезновение горных ледников во многих районах мира из-за потепления практически неизбежно, это лишь вопрос времени;
- вместе со льдом погибнет и содержащаяся в нем палеоклиматическая информация, что очень досадно для последующих поколений исследователей.

## 2. Общие сведения об изменении ледников Казахстана

Основные сведения по этому вопросу были взяты из работы «Водные ресурсы Казахстана. Оценка, прогноз, управление», том VI «Снежно-ледовые ресурсы Казахстана» [6]. Суммарная площадь ледников Азии оценивается в 120 560 км<sup>2</sup> [7]. Из них 3 500 км<sup>2</sup> расположено в Северной Азии и Сибири и 116–180 км<sup>2</sup> – в высоких горах Азии. Наибольшие площади оледенения сосредоточены в Гималаях (33 050 км<sup>2</sup>), горах Тянь-Шаня (15 417 км<sup>2</sup>), Каракорума (16 600 км<sup>2</sup>), Памира (12 260 км<sup>2</sup>) и Кунь-Луня (12 260 км<sup>2</sup>).

Но лишь для 18 ледников продолжительность изучения временного ряда ежегодного баланса массы

превышает 20 лет. На 12 из них наблюдения по разным причинам были прекращены в начале 1980–1990 гг. В настоящее время в высоких горах Азии наблюдения проводятся только на 5 ледниках – три из них расположены на Алтае, два – на Тянь-Шане.

Результаты мониторинга ледников не оставляют сомнений в том, что во второй половине XX – начале XXI века оледенение Земли находилось в состоянии деградации. В 1990 г. Межправительственная группа экспертов по изменению климата признала этот факт, как один из главных аргументов глобального потепления климата. В работе Е. Н. Вилесова «Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.)» [8] отмечается, что долговременный запас воды в ледниках обеспечивает до 30–40% летнего стока горных рек. Учитывая реальную возможность быстрого сокращения размеров современного оледенения, в настоящее время особенно важно проследить временные и пространственные колебания параметров ледников и изучить влияние этих колебаний на изменение водных ресурсов в районах с развитым оледенением.

На рисунке 6 показана карта горно-ледниковых районов Казахстана – от Алтая на северо-востоке до Таласского Алатау на юго-западе, насчитывающих сотни и тысячи ледников.

По материалам Каталога ледников СССР, составленного по данным 1955–1956 гг., а также по результатам более поздних определений размеров оледенения во всех горно-ледниковых районах юго-восточного Казахстана оцениваются величины и темпы сокращения числа ледников, их площадей и объемов, а также баланса их массы за 60 лет (рисунок 7).

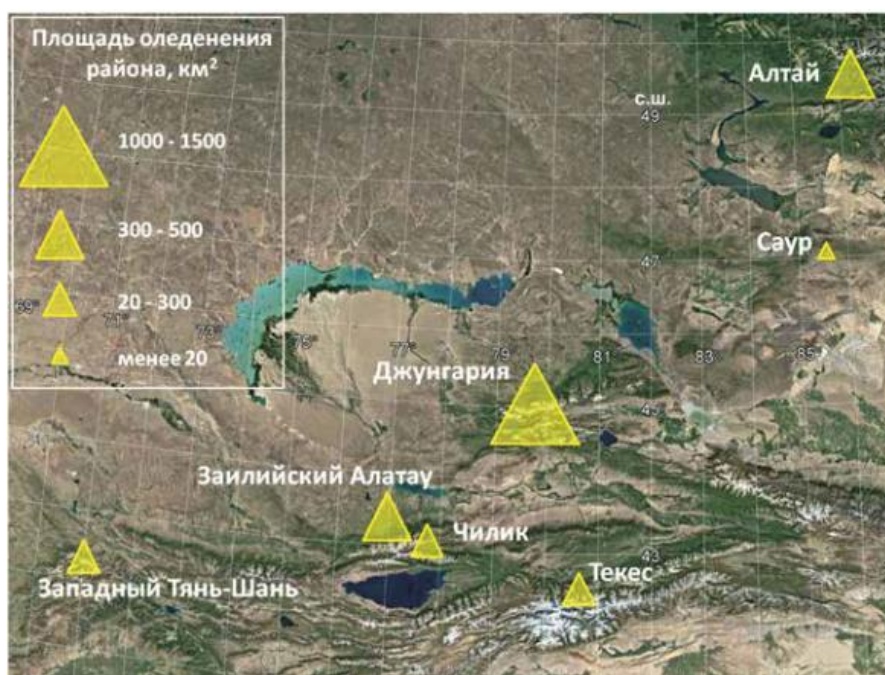


Рисунок 6. Горно-ледниковые районы юго-восточного Казахстана [8]

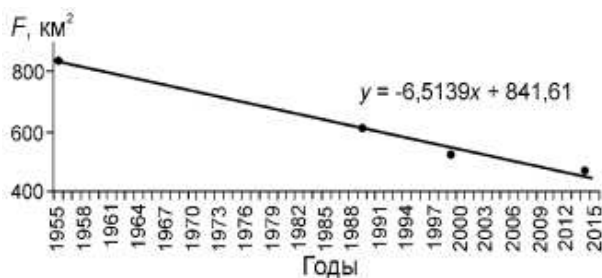


Рисунок 7. Сокращение площади ледников Казахстанской Джунгарии за 1956–2015 гг. [10]

В разные годы начала текущего столетия для изучения состояния оледенения всех ледниковых систем Казахстана стали использоваться космические снимки со спутника Landsat с разрешением 15 м. Границы ледников на космоснимках были дешифрованы и оцифрованы (векторизованы) с помощью ГИС программ ArcGIS и MapInfo [9, 10]. Полученные результаты использованы для количественной оценки происходивших изменений морфометрических параметров ледников (площади, длины, уклона и т. п.).

Джунгарский (Жетысу) Алатау – самый «оледенелый» хребет Казахстана. Самые большие относительные потери площади (48,2%) произошли у ледников, расположенных на южном макросклоне южного Центрального хребта и хр. Беджинтау. Изменение (сокращение) ледниковой площади в границах Казахстанской Джунгарии за 59-летний период (1956–2015 гг.) иллюстрирует рисунок 7. Площадь оледенения за этот период сократилась на 374 км² – с 841 до 467 км² (по 6,34 км² /год), или на 44,5% (по 0,75 %/год) Число ледников за это время уменьшилось на 462, т.е. на 32,7%. Объем льда снизился на 15,4560 км³ – с 33,3061 до 17,8501 км³, т.е. на 46,4% (по 0,79 %/год) Максимальные абсолютные потери объема льда (почти 5,4 км) отмечены у ледников Северной Джунгарии.

За 60 лет число ледников в Казахстане уменьшилось на 739, или на 26,5%. Площадь ледников сократилась во всех ледниковых районах с 1744,8 до 1032,1 км², т.е. на 712,7 км², что составляет 11,9 км² в год. Относительные изменения площади составили 40,8%, по 0,68% в год.

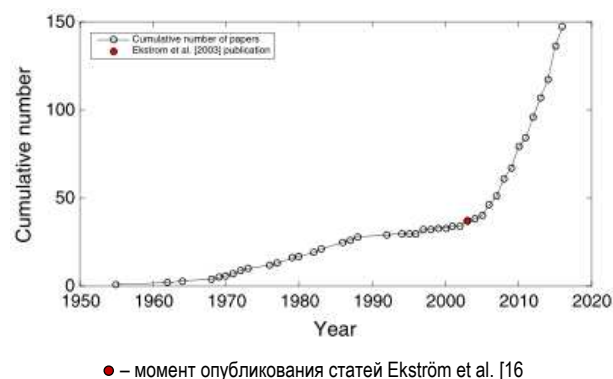
Полученные за 60 лет данные по деградации оледенения гор Казахстана представляют собой базовую основу для мониторинга последующих изменений, происходящих с ледниками в разных горно-ледниковых районах Казахстана.

### 3. Криосейсмология как новый инструмент изучения динамики ледников

В последние десятилетия начало динамично развиваться новое направление в изучении ледниковых землетрясений, называемое криосейсмологией. Особенно в последнее десятилетие наблюдается взрывной рост ежегодного числа публикаций по пассивной ледниковой сейсмологии. Сейсмические сигналы от широкого спектра процессов, связанных с ледника-

ми, заполняют довольно большой диапазон частот (от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Гц) и значительный интервал по моментной магнитуде (от  $M_w = -3$  до  $M_w = 7$ ), что позволяет по-новому взглянуть на фундаментальные процессы в криосфере. В работе [11] обсуждаются сейсмические источники в криосфере, а также исследовательские задачи на ближайшее будущее.

Еще в конце XIX века полярным исследователям (Nansen, 1897) [12] было описано явление: «... шум, похожий на выстрелы орудий... и земля содрогается». Тем не менее, до недавнего времени массивные ледяные тела, такие как в Гренландии и Антарктике, вызывали относительно небольшой интерес у сейсмологов из-за низкого уровня тектонической сейсмической активности в полярных регионах. Например, несмотря на то, что в Антарктике толчки, связанные со льдом [13, 14], были зарегистрированы за десятки лет до первых тектонических событий, зарегистрированных в регионе [15, 16], криосферная сейсмичность не была активной областью исследований в конце XX века. Ситуация резко изменилась со времени первого сообщения о так называемых «ледниковых землетрясениях» [17, 18]. Открытие этих глобально детектируемых сейсмических событиях, связанных со сбросом льда в океан, послужило толчком к многочисленным теоретическим, экспериментальным и наблюдательным исследованиям криогенных сейсмических явлений и ледовых землетрясений (под «ледовыми землетрясениями» мы понимаем ко-сейсмические события хрупкого разрушения во льдах). После этих статей число соответствующих научных исследований резко возросло (рисунок 8), что привело к установке новых сейсмических сетей, финансируемых на международном уровне, и многочисленным сессиям, посвященным ледниковой сейсмологии, на различных конференциях, (например, AGU 2010 г., EGU GA 2011 г., JGU в 2015 и 2016 гг., IUGG 2013 и 2015 гг. и ESC GA 2016 г.).



● – момент опубликования статей Ekström et al. [16]

Рисунок 8. Общее количество статей по пассивной ледниковой сейсмичности, 1950–2016 гг. (из работы [11])

С момента проведения первых исследований было опубликовано более 150 статей на эту тему, причем большинство статей появилось после основополагающей работы Ekström et al. [16] о ледниковых зе-

млетрясениях. Их первоначальная интерпретация в выражении внезапных подвижек ледников в качестве механизма источника требовала смещения объемов льда порядка  $10 \text{ км}^3$  на 10 м в течение минуты или меньше. Несмотря на то, что эта цифра казалась нереально большой, большинство измерений смещения поверхности ледников и ледяных потоков в тот момент не имели достаточного временного разрешения, чтобы опровергнуть эту гипотезу. **Таким образом, открытие ледниковых землетрясений привело к развитию широкого спектра новых геофизических исследований.** Это пример того, как внедрение новых аналитических инструментов может вдохновить на новое видение тектоники и динамики ледников.

Обзор в работе [11] начинается с ознакомления с основными типами сейсмических источников в криосфере и их особенностями, после чего следует обсуждение процессов и свойств ледникового льда, определяемых с помощью сейсмических сигналов. Основное внимание уделяется сейсмическим сигналам, исходящим от ледников и ледяных щитов.

Работа, посвященная криосейсмологии, как обзор в этой области, представлена в докладе Виноградова Ю. А. (Геофизическая служба РАН, Пермь, 2019 г.). Криосейсмология – междисциплинарная наука, объединяющая два направления наук о Земле – сейсмологию и гляциологию. Криосейсмология исследует сейсмические и инфразвуковые волны, генерируемые на границах лед-океан, лед-земная поверхность. Они возникают при разрушении ледниковых покровов, деструктивных процессах в криолитосфере в зоне вечной мерзлоты. После статей [17–19] большинство работ было сфокусировано на изучении различных проявлений сейсмичности именно в арктической зоне. В частности, работы российских и норвежских ученых сосредоточены на изучении явлений, связанных со льдом, на архипелаге Шпицберген, где находятся более 100 пульсирующих ледников (рисунок 9) [20–23]. Результаты исследований заключаются в том, что были обнаружены изменения количества сейсмических событий, сезонный характер сейсмичности для событий с  $1 > M \geq 2,2$ , согласующийся с изменениями температуры (рисунок 10).

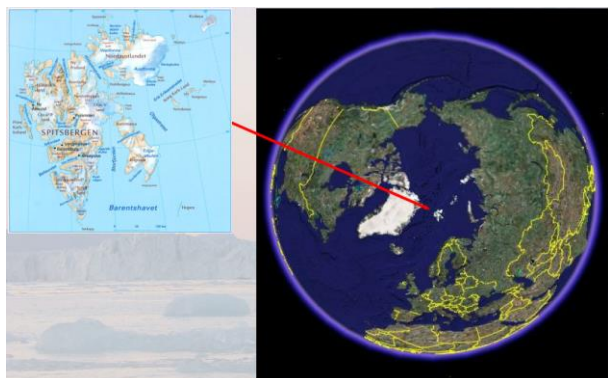


Рисунок 9. Архипелаг Шпицберген [20]

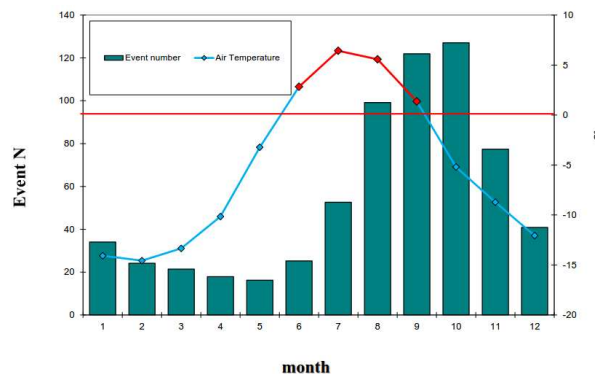


Рисунок 10. Сезонный характер сейсмичности ледовых землетрясений с  $1 \leq M \leq 2,2$  [20]

Также сезонный характер ледниковой сейсмичности отмечен и в количестве инфразвуковых событий (рисунок 11).

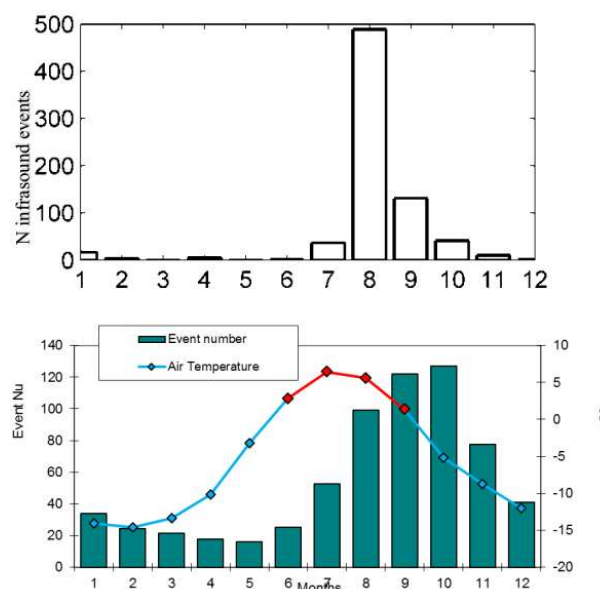


Рисунок 11. Среднемесячное количество инфразвуковых событий в 2011–2015 гг. [20]

Результаты многочисленных исследований [20–30] показывают, что суточная температура воздуха модулирует ледниковую сейсмичность. Открытая поверхность ледника испытывает тепловое сжатие, когда ледник остывает, тогда как участки, изолированные толстым мусором, не испытывают такой термической нагрузки. Таким образом, для незащищенного льда каждую ночь поверхность растрескивается, что постепенно повреждает и выветривает лед. Подобные процессы наблюдаются впервые при относительно теплых температурах и за пределами поверхности земли. Расселины и трещины являются принципиально важными компонентами баланса массы ледников [31–33]. Например, они служат путями талой воды в ледниковую водопроницаемую систему и, следовательно, приносят огромное количество скрытого тепла в ледник. Однако, ранее ни одно из предыдущих

исследований не фокусировалось на механике разрушения покрытых обломками или гималайских ледников, что позволяет предположить, что о них известно очень мало.

#### 4. Изучение динамики ледников сейсмическими методами в зоне Тянь-Шаня по литературным данным

В горных районах Тянь-Шаня почти нет работ по криосейсмологии, хотя хорошо известно, что здесь находятся масштабные ледники. Особенно интересным представляется изучение ледника Энгильчек в области высокого Тянь-Шаня.

Исследования этого ледника описаны в ряде работ, проводимых сотрудниками Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ) совместно с Немецким Центром Исследований Земли (GFZ), Потсдам.

В 2019 г. появилась статья авторов Усупаев Ш.Э., Асминг В.Э. и др. «О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгильчек в бассейне реки Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня» [34]. В статье рассматривается район ледника Энгильчек, расположенного у хребта Хан-Тенгри в бассейне р. Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня. Здесь была установлена сейсмическая станция ЦАИИЗ «Мерцбахер», выявлен ряд сейсмических событий, ассоциируемых с активностью ледников. Записи событий различаются по спектральному составу, что позволяет предположить разную природу этих событий. Было выявлено большое количество слабых и средней магнитуды сейсмических событий.

Сотрудники ЦАИИЗ производили комплекс работ по сейсмическому, гляциальному мониторингу и зондированию ледника Энгильчек. Аэрофотограмметрические измерения позволили определить, что мощность ледника Энгильчек в районе оз. Мерцбахера составляет 375 м. В районе ледника были установлены три сейсмические станции. Схема наблюдений показана на рисунке 12.

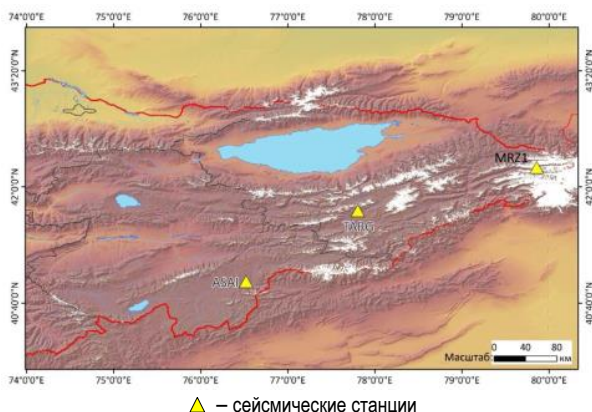


Рисунок 12. Схема сейсмических наблюдений ЦАИИЗ [34]

Но после анализа данных записи слабых землетрясений были обнаружены только на одной станции – Мерцбахер. Весь анализ проведен по одной стан-

ции. За весь период наблюдений представительными для анализа оказались данные только за два месяца – март и апрель 2018 года. По этим данным были обнаружены всего 179 сейсмических событий, ассоциированных с активностью ледников. Магнитуда этих событий составляла от 0,9 до 2,5.

Большую активность проявлял Северный Энгильчек. Однако точность определений была невысока, поэтому нельзя утверждать, что это именно так. Был сделан спектральный анализ наиболее сильных событий из зарегистрированной серии событий. Он показал, что все события можно разделить на две группы. Первый тип событий — это низкочастотные события, пик спектральной мощности лежит в полосе от 1.5 до 2,5 Гц. Второй тип – максимум спектральной мощности в полосе от 3 до 5 Гц. По-видимому, природа этих двух типов событий различна (см. рисунок 13).

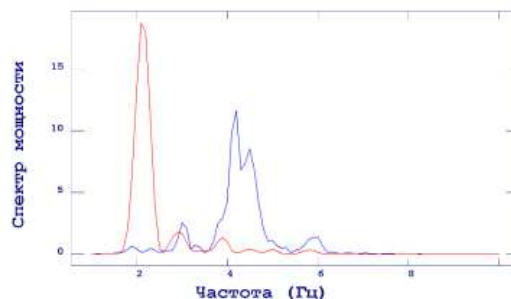
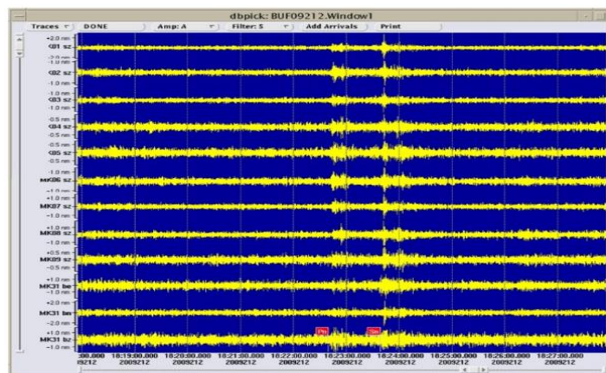


Рисунок 13. Два типа спектров сейсмических событий (относительные единицы) [34]

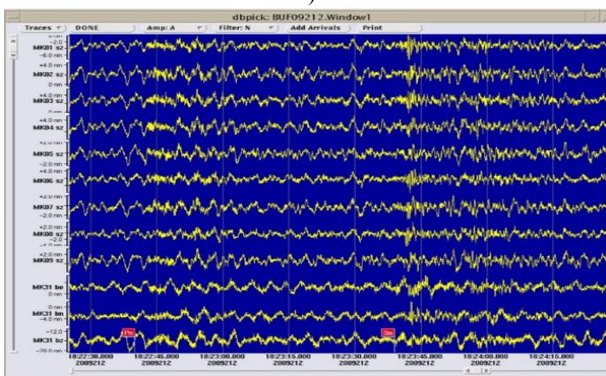
Авторы отметили, что даже данные одиночной сейсмостанции с успехом могут быть применены для изучения динамики близких к ним ледников при условии проведения аккуратной калибровки скоростной модели и определения систематических погрешностей поляризационных азимутов. Лучшим вариантом, несомненно, будет установка нескольких станций вокруг изучаемого ледника [34].

Как показал проведенный анализ литературных источников, статья авторов из НЯЦ РК Михайловой Н. Н. и Комарова И. И. [35] остается первой в изучении ледовых землетрясений горных ледников. Мы не встретили в научной печати аналогичного подхода в использовании сейсмической группы для дистанционной регистрации слабых событий, ассоциированных с ледовыми событиями (рисунок 14). Статья была опубликована в 2009 году [35] и посвящена изучению природы сейсмических событий, происходящих в так называемом «высотном» Тянь-Шане, к которому относится часть горного Центрального Тянь-Шаня, включающего значительное число вершин высотой более 6000 м. Большая часть этой территории находится в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая, меньшая часть (в 4–5 раз меньше) – в пределах Казахстана и Кыргызстана. В Китае, вблизи границы с Кыргызстаном находится самый северный семитысячник в мире высотой 7439 м – пик Победы (называемый в Китае – Томур). Географически вся

высотная часть Тянь-Шаня расположена восточнее меридиана 79° в.д. и имеет протяженность с запада на восток (между параллелями 41° и 43° с.ш.) несколько сот километров.



а)



б)

Рисунок 14. Вид записей исследуемых событий станцией PS23-Маканчи: а – обзорная; б – отдельная запись события всеми элементами группы [35]

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены мировые и отечественные источники по изменению ледников под влиянием глобального потепления. Подчеркивается, что в последнем периоде исследований (с начала XXI века) особое внимание уделяется геофизическим методам изучения процессов в ледниках, в частности, развитию нового направления – криосейсмологии. Для горных ледников пока очень мало экспериментальных работ по сейсмологическим исследованиям. Нигде в мире не описан дистанционный метод контроля процессов деструкции ледников, который развивается в нашем исследовании.

Таким образом, проведенные нами в 2003–2008 гг. исследования впервые позволили подойти к объяснению природы сейсмических сигналов, регистрируемых в большом количестве станциями Казахстана. Представляется, что ледники Тянь-Шаня выступают постоянными генераторами слабых землетрясений. Дальнейшие наблюдения за событиями позволят более детально изучить закономерности проявления и динамику развития процессов в ледниках Центрального Тянь-Шаня.

Новым этапом в изучении этих процессов станут исследования по влиянию глобальных изменений климата на ледники Тянь-Шаня с использованием уникальных возможностей сейсмических групп НЯЦ РК, входящих в международные сети мониторинга ядерных взрывов и землетрясений, в комплексе с установленными вблизи ледника полевыми сейсмическими и инфразвуковыми станциями.

### Благодарности

Работа проведена при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21881915).

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. С. Кутузов, О. Соломина. Современные изменения горных ледников и климат. Материалы международного форума «Устойчивое развитие горных территорий». Санкт-Петербург, 12–13 октября 2023 г. [S. Kutuzov, O. Solomina. Sovremennye izmeneniya gornyykh lednikov i klimat. Materialy mezhdunarodnogo foruma «Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy». Sankt-Peterburg, 12–13 oktyabrya 2023 g.] (In Russ.)
2. M. Zemp, M. Huss, E. Thibert et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. – 2019. Vol. 568/ – P. 382–386
3. S. Dankendorf, M. Marcos, Guy Woppelmann, Riccardo Riva. Reassessment of 20th century global mean sea level rise // Environmental sciences. – May 22, 2017. Vol. 114 (23). – P. 5946–5951.
4. Бушуева И.С., Соломина О.Н. Колебания ледника Кашкаташ в XVII–XXI в.в. по картографическим, дендрохронологическим и лихенометрическим данным //Лед и снег. – 2012. – № 2(118). – С. 121–130. [Bushueva I.S., Solomina O.N. Kolebaniya lednika Kashkatash v XVII–XXI v.v. po kartograficheskim, dendrokronologicheskim i likhenometricheskim dannym //Led i sneg. – 2012. – No. 2(118). – P. 121–130.] (In Russ.)
5. Специальный доклад МГЭИК «Океан и криосфера», 2019 Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate – (ipcc.ch)
6. И.В. Северский, А.Л. Кокарев, Н.В. Пиманкина. Снежно-ледовые ресурсы Казахстана. – Алматы. – 2012. – 244 с. [I.V. Severskiy, A.L. Kokarev, N.V. Pimankina. Snezhno-ledovyye resursy Kazakhstana. – Almaty. – 2012. – 244 p.]
7. M. Dyurgerov, M. Meier. Glaciers and Changing Earth System : A 2004 Snapshot. Occasional Paper 58, Institute of Arctic and Alpine Research, – 2005.
8. Е.Н. Вилесов. Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.). Лед и снег. – 2018. – Т. 58. – № 2. – С. 159–170. [E.N. Vilesov. Izmeneniye razmerov i sostoyaniya lednikov Kazakhstana za 60 let (1955–2015 gg.). Led i sneg. – 2018. – Vol. 58. – No. 2. – P. 159–170.] (In Russ.)
9. Е.Н. Вилесов. Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. – Алматы: КазНУ, – 2016. – 268 с. [E.N. Vilesov. Dinamika i sovremennoye sostoyaniye oledeniya gor Kazakhstana. – Almaty: KazNU, – 2016. – 268 p.] (In Russ.)
10. Е.Н. Вилесов, В.И. Морозова, И.В. Северский. Оледенение Джунгарского (Жетысу) Алатау: прошлое, на-

- стоящее, будущее. – Алматы: КазНУ. – 2013. – 244 с. [E.N. Vilesov, V.I. Morozova, I.V. Severskiy. Oledenenie Dzhungarskogo (Zhetysu) Alatau: proshloe, nastoyashchee, budushchee. – Алматы: KazNU. – 2013. – 244 p.] (In Russ.)
11. E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // *Reviews of Geophysics*. – 2016. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
  12. F. Nansen, Fhargest North. – New York: Harper and Brothers Publ. – 1897. – Vol. 2.
  13. Adams R.D., Antarctic earthquakes // *Nature*. – 1988. – Vol. 331. – P. 665.
  14. Adams R.D., A.A. Hughes, B.M. Zhang. (1985) A confirming earthquake in continental Antarctica // *Geophys. J.R.Astron. Soc.* – 1985. – Vol. 81. – P. 489–492.
  15. Adams R.D. Small earthquakes in Victoria Land, Antarctica // *Nature*. – 1069. – Vol. 224. – P. 255–256.
  16. Ekström G., M. Nettles and G.A. Abers, Glacial earthquakes // *Science*. – 2003. – Vol. 302 (5645). – P. 622–624, <https://doi.org/10.1126/science.1088057>
  17. Ekström G., M. Nettles and V.C. Tsai, Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // *Science*. – 2006. – Vol. 311(5768). – P. 1756–1758. <https://doi.org/10.1126/science.1122112>
  18. Larose E., et al. (2015) Environmental seismology: What can we learn on earth surface process with ambient noise? // *J.Appl.Geophys.* – 2015. – Vol. 116. – P. 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.001>
  19. Tsai V.C. and G.Ekström (2007). Analysis of glacial earthquakes // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – P. F03S22. <https://doi.org/10.1029/2006JF000596>
  20. А.В. Федоров, В.Э. Асминг, С.В. Баранов, А.Н. Виноградов, З.А. Евтугина, В.А. Горюнов. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген // *Вестник МГТУ*. – 2016. – Т. 19. – № 1/1. – С. 151–159. [A.V. Fedorov, V.E. Asming, S.V. Baranov, A.N. Vinogradov, Z.A. Evtyugina, V.A. Goryunov. Seysmologicheskie nablyudeniya za aktivnost'yu lednikov arhipelaga Shpitsbergen // *Vestnik MGTU*. – 2016. – Vol. 19. – No. 1/1. – P. 151–159.] (In Russ.)
  21. А.В. Федоров, В.Э. Асминг. Низкочастотные землетрясения архипелага Шпицберген // *Комплексные исследования природы Шпицбергена // Материалы международной научной конференции. Мурманск, 1–3 ноября, 2012 г. – Вып. 11. – С. 249–253. [A.V. Fedorov, V.E. Asming. Nizkochastotnye zemletryaseniya arhipelaga Shpitsbergen // *Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Murmansk, 1–3 noyabrya, 2012 g. – Issue 11. – P. 249–253]* (In Russ.)*
  22. A. Köhler, Ch. Nuth, J. Kohler, E. Berthier, C. Weidle, J. Schweitzer. A 15-year record of frontal glacier ablation rates estimated from seismic data // *Geophysical Research Letters*. – Vol. 43(23). – P. 12155–12164, <https://doi.org/10.1002/2016GL070589>
  23. A. Köhler, Ch. Nuth, J. Schweitzer, C. Weidle, S. Gibbons. Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard // *Polar Research*. – 2015. – Vol. 34. – P. 26178. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.26178>
  24. A. Köhler, M. Pętlіcki, Pierre-Marie Lefevre, G. Buscaino, Ch. Nuth, Ch. Weidle. Contribution of calving to frontal ablation quantified from seismic and hydroacoustic observations calibrated with lidar volume measurements // *The Cryosphere*. – Vol. 13. – P. 3117–3137. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3117-2019>
  25. A. Köhler, V. Maupin, Ch. Nuth, Ward Van Pelt. Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Høltedahlfonna, Svalbard // *Annals of Glaciology*. – 2019. – Vol. 60 (79). – P. 23–36. <https://doi.org/10.1017/aog.2019.15>
  26. D. Tetzner Ivovich. Crio-sismologia: Qué pasa con los glaciares cuando tiembla? 2021. <https://glaciarschilenos.org>
  27. Kanao, M. (2018a). A Decade of Advances in Cryoseismology. In *Polar Seismology – Advances and Impact*. IntechOpen.
  28. Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment. *Polar Seismology – Advances and Impact*, 75.
  29. O. Lamb, J. Lees, L. Marin, J. Lazo, A. Rivera, M. Shore, S. Lee. Investigating potential icequakes at Llaima volcano, Chile // *Volcanica*. – 2020. – Chile. – P. 29–42.
  30. E. Podolskiy, K. Fujita, S. Sunako, A. Tsushima, R. Kayastha. Nocturnal Thermal Fracturing of a Himalayan Debris-Covered Glacier Revealed by Ambient Seismic Noise // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Vol. 10.1029. – P. 9699–9709.
  31. Colgan, W., Rajaram, H., Abdalati, W., McCutchan, C., Mottram, R., Moussavi, M. S., & Grigsby, S. Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications // *Reviews of Geophysics*. – 2016. – Vol. 54(1). – P. 119–161. <https://doi.org/10.1002/2015RG000504>
  32. Cook, J. M., Hodson, A. J., & Irvine-Fynn, T. D. L. Supraglacial weathering crust dynamics inferred from cryoconite hole hydrology // *Hydrological Processes*. – 2016. – Vol. 30(3). – P. 433–446. <https://doi.org/10.1002/hyp.10602>
  33. Sakai, A., & Fujita, K. Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7(1). – P. 13717. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14256-5>
  34. Усупаев Ш.Э., Асминг В.Э., Шаршебаев А.К., Алтынбек уулу Т., Рахматилла уулу З., Анаркулов Б.А. О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгилчек в бассейне реки Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня // *Известия ВУЗов Кыргызстана*. – 2019. – № 12. – С. 40–49. [Usupayev Sh.E., Asming V.E., Sharshebaev A.K., Altynbek uulu T., Rakhmatilla uulu Z., Anarkulov B.A. O zemletryasenyakh glyatsiotektonicheskogo kharaktera gornyykh stran na primere lednika Engilchek v basseyne reki Sary-Dzhaz Kyrgyzskogo Tian'-Shanya // *Izvestiya VUZov Kyrgyzstana*. – 2019. – No. 12. – P. 40–49.] (In Russ.)
  35. Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // *Вестник НЯЦ РК*. – 2009. – Вып. 3. – С. 120–126. [Mikhailova N.N., Komarov I.I. Glacial Earthquakes of the Central Tian-Shan / N.N. Mikhaylova, I.I. Komarov // *NNC RK Bulletin*. – 2009. – Issue 3. – P. 120–126.] (In Russ.)



## КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ӘСЕРІНЕН МҰЗДЫҚТАРДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ БОЙЫНША ӘЛЕМДІК ЖӘНЕ ОТАНДЫҚ ДЕРЕККӨЗДЕРГЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ

**Н. Н. Михайлова\***, А. С. Мукамбаев, В. Г. Морозов, Е. Н. Казаков, У. А. Игибаев

*ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

*\* Байланыс үшін E-mail: mikhailova@kndc.kz*

Жаһандық климаттың өзгеруі адам қызметінің барлық салаларына және жалпы әлемдік экожүйеге әсер етеді. Температураның жоғарылауы, атап айтқанда, мұздықтардың еруінің жеделдеуіне әкеледі, бұл өз кезегінде мұздық қоректенетін өзендердің ағынының өзгеруіне әкеледі. Бұл құбылыс сөзсіз осы өзендердің суын пайдаланатын елді мекендердің өміріне әсер етеді.

ҰЯО бақылау желісінің сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялары жылдар бойы жер мен ауаның ауытқуын тіркеп келеді. Жинақталған аспаптық бақылау дерекқорында алдыңғы он жылдықтардағы климаттың өзгеруі туралы ақпарат бар, мысалы, мұздық жер сілкіністерінің жиілігі мен кеңістіктік таралуы.

Осыған байланысты, қазақстандық мониторинг желісі соңғы екі онжылдықта алған сейсмикалық және инфракызыл деректерді зерделеуге негізделген мұздықтардың жойылу режимінің өзгерістеріне талдау жүргізу және табылған заңдылықтардың жаһандық климаттың өзгеруімен байланысын зерделеу ұсынылады.

Осы мақалада климаттың таулы мұздықтарға әсері туралы қазіргі заманғы идеялар, Қазақстан мұздықтарының мөлшері мен жай-күйінің өзгеруі туралы жалпы мәліметтер сипатталған. Криво сейсмологияны мұздықтардың өзгеру динамикасын зерттеудің жаңа құралы ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылуда. Мақаланың қорытындысында әдеби деректер бойынша Тянь-Шань аймағындағы сейсмикалық әдістермен мұздықтардың динамикасын зерттеу нәтижелері келтірілген.

*Түйін сөздер:* сейсмология, климат, мұздықтар, крио сейсмология, мұздық жер сілкінісі, күнделікті вариация.

## ANALYTICAL REVIEW OF GLOBAL AND DOMESTIC SOURCES ON THE STUDY OF SEISMIC PROCESSES IN GLACIERS UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE

**N. N. Mikhailova\***, A. S. Mukambayev, V. G. Morozov, Ye. N. Kazakkov, U. A. Igibayev

*RSE NNC RK Branch "Institute of Geophysical Research", Kurchatov, Kazakhstan*

*\* E-mail for contacts: mikhailova@kndc.kz*

Global climate change affects almost all spheres of human activity and the world ecosystem as a whole. Temperature rise, in particular, leads to accelerated melting of glaciers, which in turn leads to changes in the flow of glacier-fed rivers. This phenomenon inevitably affects the livelihood of settlements that use water from these rivers.

Seismic and infrasound stations of the NNC monitoring network have been recording ground and air vibrations for many years. The accumulated database of instrumental observations contains information on climate changes in previous decades, such as the frequency and spatial distribution of glacial earthquakes.

In this regard, it is proposed to analyze the changes in the glacier destruction regime based on the study of seismic and infrasound data obtained over the last two decades by the Kazakhstan monitoring network and to study the relationship of the found patterns with global climate change.

This paper describes modern ideas about climate influence on mountain glaciers, general information about changes in the size and condition of glaciers in Kazakhstan. The possibility of using cryoseismology as a new tool for studying the dynamics of glacier changes is considered. The paper concludes with the results of the study of glacier dynamics using seismic methods in the Tien-Shan area according to the literature data.

**Keywords:** *seismology, climate, glaciers, cryoseismology, glacial earthquakes, daily variations.*