

*Усупаев Ш.Э., Асминг В.Э., Шаршебаев А.К., Алтынбек уулу Т.,  
Рахматилла уулу З., Анаркулов Б.А.*

**КЫРГЫЗ ТЯН-ШАНЫНЫН САРЫ-ЖАЗ ДААРЫЯ БАЗАСЫНДАГЫ  
ЭНГИЛЧЕК МӨНГҮ МИСАЛЫНДА ТОО ӨЛКӨЛӨРҮНДӨГҮ  
ГЛАЦИОТЕКТОНИКАЛЫК МҮНӨЗДӨРДҮН ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРҮ**

*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**

*Sh.E. Usupaev, V.E. Asming, A.K. Sharshabaev, Altynbek uulu T,  
Rakhmatilla uulu Z, B.A. Anarkulov*

**EARTHQUAKES OF GLACIOTECTONIC CHARACTER OF MOUNTAIN  
COUNTRIES ON THE EXAMPLE OF THE ENGILCHEK GLACIER IN THE  
SARY-JAZZ RIVER BASIN OF THE KYRGYZ TYAN-SHAN**

УДК: 551.11: 624.131: 621.3

Макалада Эңгилчек мөңгүсүнүн дарыянын бассейниндеги Хан-Теңгри кырка тоосунда жайгашкан аймагы каралат. Кыргыз Тянь-Шандын Сары-Джазы. Эңгилчек мөңгүсүнө жакын жерде жайгашкан Мерцбахер станциясынан алынган маалыматтарды иштетүүнүн натыйжасында, бул мөңгүнүн активдүүлүгүнө байланыштуу алсыз жана орто балдагы 1,4 сейсикалык кубулуштар аныкталды. Мөңгүнүн көлөмү, формасы жана калыңдыгы жана ага жакын жерде жайгашкан бийик тоолуу Мерцбахер көлү, ошондой эле бул аймактын тектоникалык түзүлүшүнүн өзгөчөлүктөрү жөнүндө кыскача маалымат берилет. Бул жерде САИАГ кызматкерлери орноткон "Мерцбахер" сейсикалык станциясынын маалыматтарына анализ жүргүзүлүп, мөңгүлөрдүн активдүүлүгүнө байланыштуу бир катар сейсикалык окуялар аныкталды. Окуянын жазуулары спектралдык курамы боюнча айырмаланат, бул башка мүнөздөгү окуялар жазылган деп божомолдойт. Бирдиктүү сейсикалык станцияны колдонуп мөңгүлөрдүн динамикасын байкоонун негизги мүмкүнчүлүгү көрсөтүлгөн. Эңгилчек мөңгүсүнө жакын жерде жайгашкан Мерцбахер станциясынан алынган маалыматтарды иштетүүнүн натыйжасында, бул мөңгүнүн активдүүлүгүнө байланыштуу алсыз жана орто балдагы 1,4 сейсикалык кубулуштар аныкталды.

**Негизги сөздөр:** тоо мөңгүлөрү, муз титирөө, көл, регион, сейсикалуулук, сейсикалык станция, сейсикалык окуя, гляциотектоника.

В статье рассматривается район ледника Энгильчек, расположенного у хребта Хан-Тенгри в бассейне р.Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня. Приводятся краткие

сведения о размерах, форме и мощности ледника и находящегося в его непосредственной близости высокогорного озера Мерцбахера, а также об особенностях тектонического строения данного региона. Был проведен анализ данных установленной здесь сотрудниками ЦАИИЗ сейсмической станции «Мерцбахер», выявлен ряд сейсмических событий, ассоциирующихся с активностью ледников. Записи событий различаются по спектральному составу, что позволяет предположить, что зарегистрированы события разной природы. Показана принципиальная возможность наблюдения за динамикой ледников при помощи одиночной сейсмической станции. В результате обработки данных станции «Мерцбахер», расположенной в непосредственной близости от ледника Энгильчек, было выявлено большое количество слабых и средней магнитуды 1,4 сейсмических событий, ассоциирующихся с активностью данного ледника.

**Ключевые слова:** горные ледники, льдоотрясение, озеро, регион, сейсмичность, сейсмическая станция, сейсмическое событие, гляциотектоника.

The article examines the area of the Engilchek glacier, located at the Khan-Tengri ridge in the basin of the river Sary-Jazz of the Kyrgyz Tien Shan. Brief information is provided on the size, shape and thickness of the glacier and the high-mountain Lake Merzbacher located in its immediate vicinity, as well as on the peculiarities of the tectonic structure of this region. The analysis of the data of the seismic station "Merzbacher" installed here by the CAIAG staff was carried out; a number of seismic events associated with glacier activity were identified. Event records differ in spectral composition, which suggests that events of a different nature were recorded. The principal possi-

*bility of observing the dynamics of glaciers using a single seismic station is shown. As a result of data processing from the Merzbacher station located in the immediate vicinity of the Engilchek glacier, a large number of weak and medium magnitude 1.4 seismic events associated with the activity of this glacier were identified.*

**Key words:** *mountain glaciers, ice quake, lake, region, seismicity, seismic station, seismic event, glaciotectonics.*

**Введение.** Потепление климата в условиях горных стран приводит к гляциотектоническим подвижкам, растрескиванию льдов с формированием ледовых разломов, ведущих к деградации ледников. Разрушение ледников может привести к катастрофическим последствиям. Поэтому исследование динамики ледников является актуальным и необходимым для обеспечения безопасности населения территорий, примыкающих к ледникам.

Сотрудниками Центрально-Азиатского институ-

та прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ) производились работы по зондированию, сейсмическому и гляциальному мониторингу ледника Энгильчек в верховье бассейна реки Сары-Джаз. Все исследования проводились на базе высокогорной геонаучной станции Готфрида Мерцбахера созданной ЦАИИЗ совместно с Немецким центром космических исследований Земли, GFZ Potsdam (рис. 1).

По результатам зондирования была определена мощность ледника. В 2009 г. в непосредственной близости от ледника была установлена трехкомпонентная сейсмическая станция MRZ1. Она зарегистрировала большое количество слабых сейсмических событий, ассоциирующихся с активностью ледника. Таким образом, была показана применимость сейсмического метода для обнаружения и локации льдотрясений и, тем самым, оценки динамики ледников даже с использованием одиночной трехкомпонентной станции.



**Рис. 1.** Высокогорная научная станция Готфрида Мерцбахера, созданная на леднике Энгильчек (абс. отметка 3600 м.).

**Район исследования.** Энгильчек является самым большим из ледников, расположенных в Кыргызском Тянь-Шане. Ледник Энгильчек формируется у подножия пика Хан-Тенгри, далее на западе пересекается хребтом Броненосец на северную и южную

троговые долины, ледники которых по окончании указанного хребта субширотного простираения вновь объединяются в единое ледовое тело, образуя в конце ледника Северный Энгильчек высокогорное ледовое озеро Мерцбахера [3].

Длина Южного Энгильчека в 1985 г. составляла 60,5 км, а площадь 632,3 км<sup>2</sup>. В 1990 г. длина сократилась до 60 км, а площадь до 533 км<sup>2</sup>. Длина языка составляет 43,2 км при средней ширине 2,2 км, спускается до 2800 м со средним уклоном поверхности около 2 [2].

Талая вода ледника питает реку Энгильчек, которая является трансграничным притоком реки Сары-Джаз [1].

Между хребтами Сарыджаз и Тенгри-Таг на запад течет большой ледник Северный Энгильчек. Длина ледника составляет 38,2 км, площадь 203 км<sup>2</sup> [2].

Озеро Мерцбахера расположено в месте соединения Северного и Южного Энгильчека на высоте 3304 метра над уровнем моря. С 1902 по 2012 гг. здесь произошло 115 прорывов водных масс из чаши водоема по каналам стока в его ледовой плотине. В базе данных зафиксированы даты 74 прорывов. Прорывы воды из озера происходили с мая по декабрь. Наибольшее количество прорывов ледовой плотины - 37% происходило по августам, 26% по сентяблям, 19% по июлям, 16% по октяблям [5].

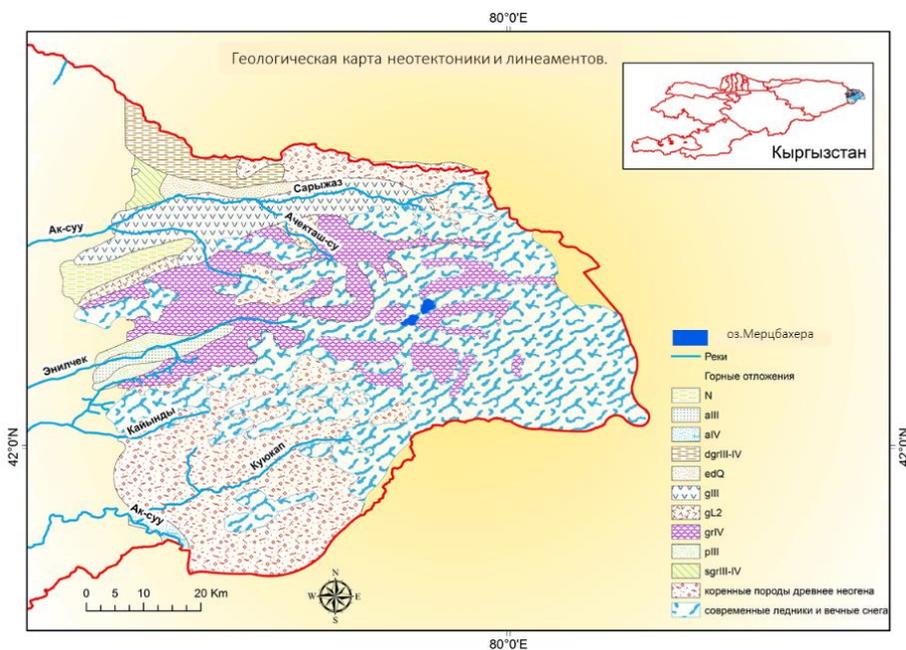
Аэрофотолокационные измерения позволили определить, что мощность ледника Энгильчек в районе оз. Мерцбахера составляет 375 м.

В целом мощность ледникового массива варьирует от 250 м до 350 м. Ледник Энгильчек имеет слоистое строение, мощность верхнего слоя составляет 44-66 м., среднего 25-60 м., нижнего 60-250 м. [4].

По измерениям радиозондами мощность ледника Южный Энгильчек изменяется в пределах 350-400 м. [6].

По измерениям электрических сопротивлений методами ВЭЗ и частотного электромагнитного зондирования на продольном профиле длиной 800 м. между верхним и нижним частями оз. Мерцбахера выявили 3 слоя мерзлых грунтов: верхний из флювиогляциальных грунтов мощностью 3-5 м.; средний сезонно-талый слой из тонких слоев льда, переслаивающегося с илом мощностью до 10 м.; нижний, состоящий из погребенного флювиогляциального грунта и мертвого льда ледника Северный Энгильчек мощностью более 30 м [8].

Ледники Северный Энгильчек и наиболее активный Южный Энгильчек, а также озеро Мерцбахера располагаются в зоне активного влияния разломов и линеамента (рис. 2а, б).



а)

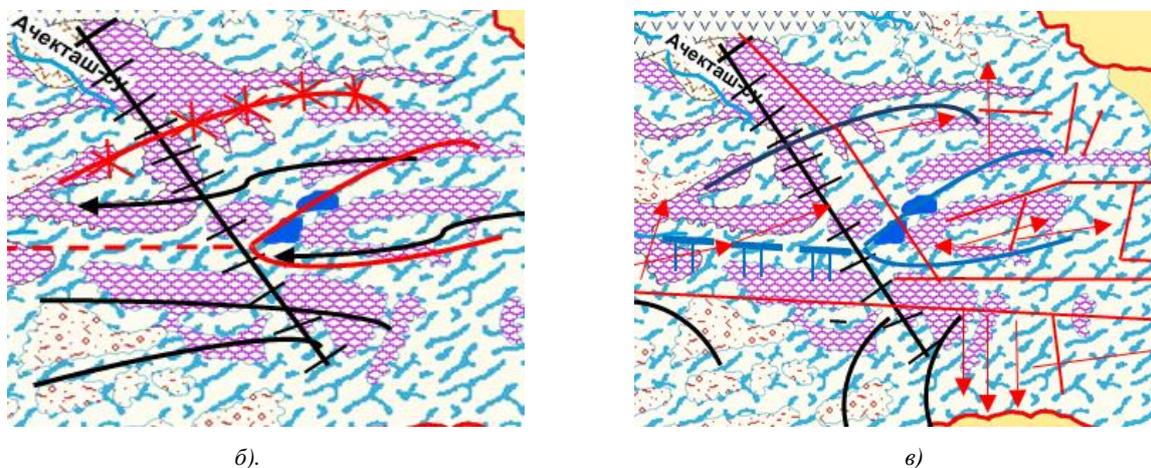


Рис. 2. а) Фрагмент геологической карты неотектоники, б) линеаментов и в) кольцевых структур на ледниках Энгильчека.

На карте новейшей тектоники прорывоопасное ледниковое оз. Мерцбахера (рис. 2а) расположено на ступени доорогенной поверхности выравнивания с суммарной деформацией от 5 до 6 километров. Южная антиклинальная ось, достигая плотинной части озера, обрывается, в связи с проходящим западнее плотины, в направлении с юго-востока на северо-запад региональным линеаментом. Ось антиклинальной складки основания, севернее которой располагается озеро Мерцбахера, отделяется пересекающимися с региональным линеаментом и друг с другом в один узел западнее плотины озера разрывными нарушениями.

Северный разлом пересекает дно верхней и проходит по северному берегу нижней части исследуемого озера Мерцбахера. Ледник Южный Энгильчек с позиций новейшей тектоники расположен на более низкой гипсометрической отметке, где ступени суммарных деформаций до орогенной поверхности выравнивания варьирует от 3,5 до 5 км [3].

На карте сейсмотектоники исследуемый район находится в зоне новейшего устойчивого поднятия, при этом сохраняет позиции расположения описанных выше на карте новейшей тектоники разломов и регионального линеамента. Особенностью карты сейсмотектоники также является то, что в западной части от плотины озера Мерцбахера, начиная с узла пересечения разломов и регионального линеамента, имеет место зона переходного режима в виде блока предгорного поднятия, что положительно воздействует на формирование прорыва опасной ледовой плотины

исследуемого озера [7].

На карте линеаментов и кольцевых структур (рис. 2б, 2в) синим цветом показаны краевые разломы, а красным цветом региональные и локальные линеаменты, выделенные в виде разлома. Из карты видно, что нижнее озеро Мерцбахера отделяется в виде тектонического блока от ее верхней части разрывными нарушениями и линеаментами. На южном борту ледника Южный Энгильчек, от ледника Шокальского до пика Нансена, имеются три полукольцевые структуры.

В рассматриваемом районе наблюдается умеренная сейсмическая активность. Так, в 2018 году сейсмической сетью ЦАИИЗ здесь были зарегистрированы землетрясения с магнитудами, достигающими до 4.8 м (рис. 3).

**Методология работы и использованные данные.** Были проанализированы данные трех трехкомпонентных сейсмостанций ЦАИИЗ, расположенных ближе всего к ледникам Энгильчек - Аксай (ASAI), Тарагай (TARG) и Мерцбахер (MRZ1) (рис. 3) за период январь-декабрь 2018 г.

Для обработки данных использовалась программа одностанционной обработки NSS, разработанная в Кольском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (Россия). Эта программа находит в непрерывных записях трехкомпонентных сейсмостанций моменты превышения уровня сигнала над шумом (детектор STA-LTA), которые могут оказаться моментами приходов (вступлений) сейсмических волн на станцию.

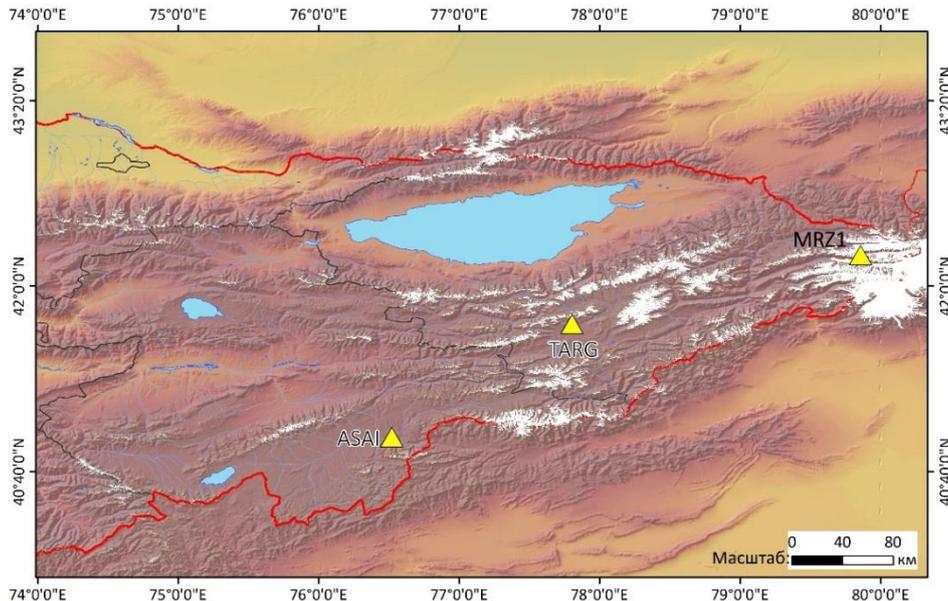


Рис. 3. Сейсмическая сеть ЦАИИЗ.

Далее, все обнаруженные таким образом вступления анализируются попарно, и для каждой пары проверяется гипотеза, что первое является вступлением Р, а второе – S-волны от одного и того же события. При этом используется сложный набор критериев, включающий совместный поляризационный анализ, форму огибающей, амплитудные оценки. Для тех пар, для которых гипотеза была признана истинной, расстояние оценивается по разности времен приходов волн Р и S, а азимут – по поляризации Р-волны. Глубина события в этой программе не оценивается. В работе [9] подробно описаны алгоритмы детектирования и локации программы NSS, а также приводятся примеры ее успешного применения для мониторинга активности ледников архипелага Шпицберген.

После того, как данные упомянутых трех сейсмостанций были пропущены через программу NSS, оказалось, что записи слабых ледниковых событий обнаружались только по данным станции «Мерцбахер». Поэтому дальнейший анализ производился только по данным этой станции.

Результаты локации событий по одной трехкомпонентной сейсмостанции неточны – возможны ошибки определения поляризационного азимута на события, тем большие, чем меньше отношение сигнал/шум для Р-волны. Кроме того, возможна систематическая ошибка в том случае, если станция ориентирована на местности не совсем точно. Для выяснения

границ погрешностей оценки азимутов для станции «Мерцбахер» были использованы результаты локации ряда региональных сейсмических событий по данным каталога ЦАИИЗ (аккуратная локация по нескольким станциям), которые сравнивались с локацией тех же событий программой NSS (рис. 4).

В среднем, погрешность при локации событий к востоку от станции составляет 10-15°. Другой источник погрешностей локации – неточность определения вступлений S-волны на записи программой NSS. В данной работе рассматриваются события, произошедшие недалеко от станции, поэтому зачастую вступления S-волны перекрывается кодой Р-волны (рис. 4). Кроме того, программа NSS принципиально не способна обнаруживать события, у которых Р и S-волны еще не разделились, т.е., произошедшие очень близко к станции. Ограничение программы NSS – разница времен приходов S и Р-волн должно быть не менее 1 сек, что соответствует расстоянию до станции около 4 км. Таким образом, NSS не способна обнаруживать события на расстояниях, меньших 4 км. Свой вклад в ошибку локации может внести неточное знание скоростной модели среды в данном регионе. Локация NSS проводилась по одномерной скоростной модели, построенной для всего Кыргызстана, строение среды в данном регионе может отличаться от модельного, а для гористой местности возможно влияние рельефа.

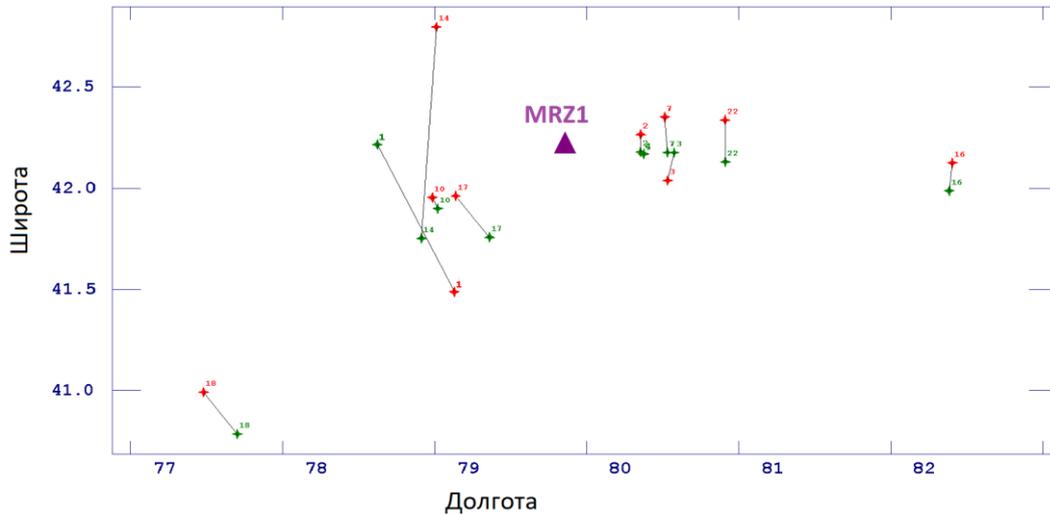


Рис. 3. Сравнение результатов локации ряда региональных землетрясений по каталогу ЦАИИЗ (красные маркеры) и по станции «Мерцбахер» программой NSS (зеленые маркеры).

Суммируя вышеизложенное, необходимо отметить, что локация сейсмических событий по одиночной станции неточна и может дать только приблизительное общее представление о пространственном распределении очагов событий. Как и любая программа автоматического детектирования, NSS не идеальна. Время от времени она допускает ошибки (неверную ассоциацию вступлений, ошибки определения азимутов и т.д.). Поэтому для получения достоверных результатов необходима проверка работы программы

NSS интерпретатором-человеком. Для этого была использована программа LOS (локатор сейсмичности), разработанная в Кольском филиале Геофизической службы РАН [10], с помощью которой можно отображать фрагменты записей, найденные NSS, корректировать результаты одностанционной обработки и отбраковывать ложные (не соответствующие реальным событиям) срабатывания детектора. Пример просмотра записи события программой LOS и отображения его локации на карте представлен на рисунке 5.

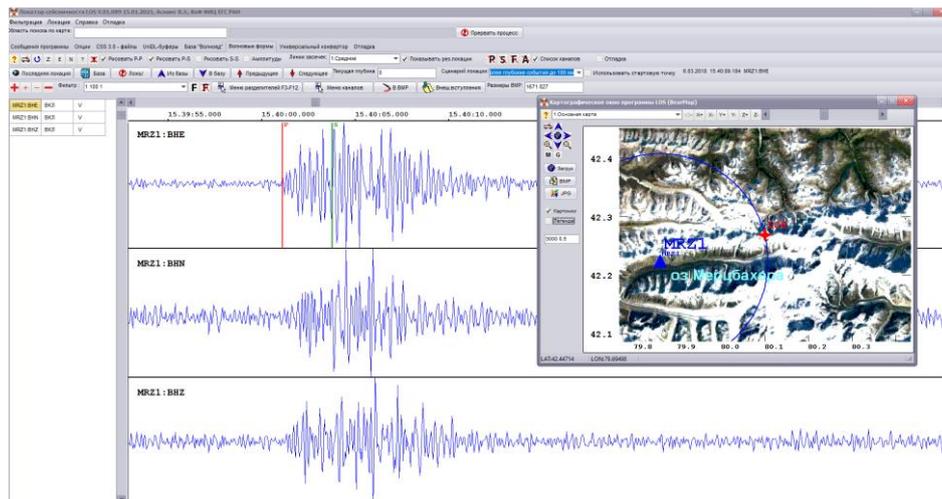


Рис. 5. Просмотр записи сейсмического события и его локация программой LOS. На записи данного события вступление S-волны видно не отчетливо, что может привести к погрешности локации (определения дальности).

Для обработки были использованы данные станции «Мерцбахер» за 2018 год. По техническим причинам (по большей части, проблемы с электропитанием) станция работала не всё время. Имело место также временное отключение одного из горизонтальных

каналов станции, что привело к невозможности использования части данных для обработки программой NSS. Процент времени, в течение которого станция работала, по месяцам показан на рисунке 6.

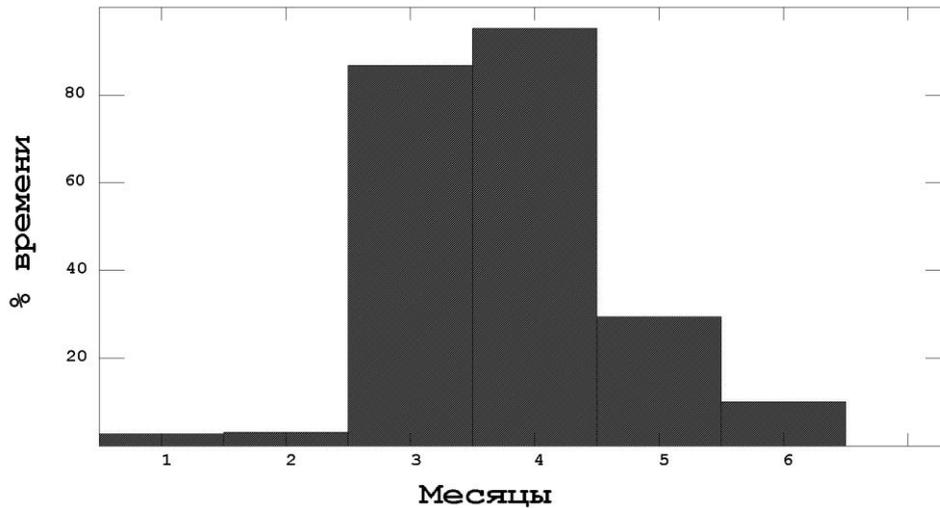


Рис. 6. Процент времени, в течение которого станция работала в 2018 г.

Таким образом, представительными месяцами для анализа являются март и апрель, и частично, май и июнь 2018 г.

**Результаты работы.** После обработки данных программой детектирования NSS и ручной обработки

было выявлено 179 сейсмических событий, ассоциирующихся с активностью ледников. Магнитуды событий варьировали от 0.9 до 2.5, средняя магнитуда составила 1.4 (рис. 7).

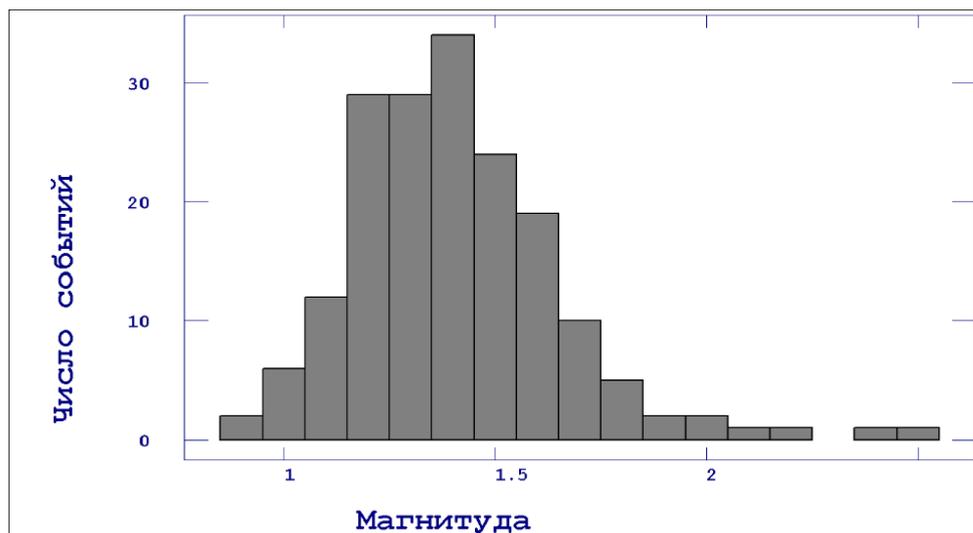


Рис. 7. Распределение обнаруженных событий по магнитудам.

Карта локации обнаруженных событий приведена на рисунке 8.

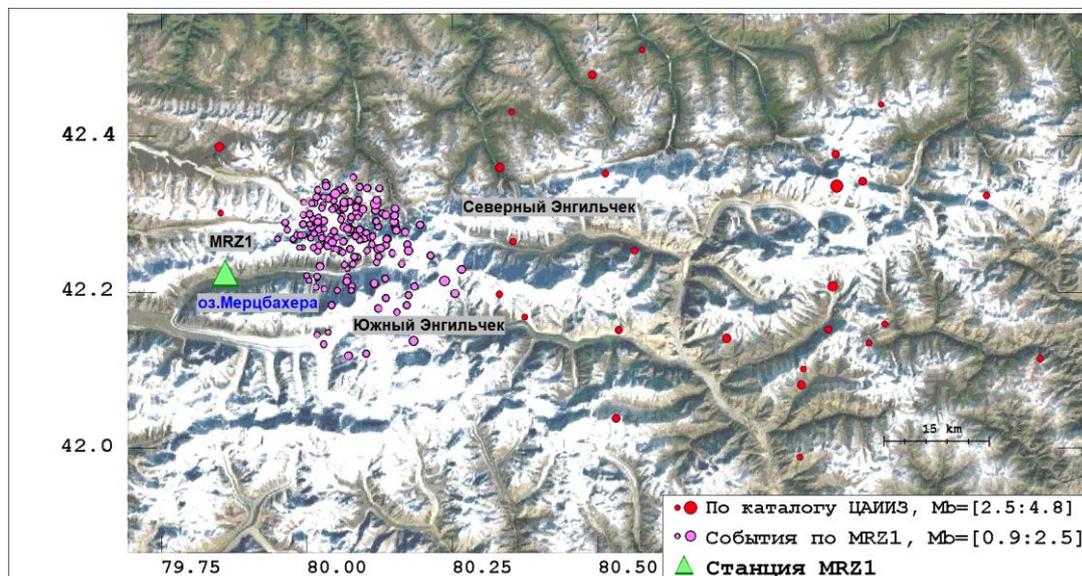


Рис. 8. Карта локации обнаруженных ледниковых событий. Также показаны землетрясения, приведенные в каталоге ЦАИИЗ за 2018 г (красные кружки).

При взгляде на эту карту, складывается впечатление, что большую активность проявлял Северный Энгильчек. Однако, принимая во внимание большую

неточность одностанционной локации, утверждать это с определенностью преждевременно. Временное распределение событий показано на рисунке 9.

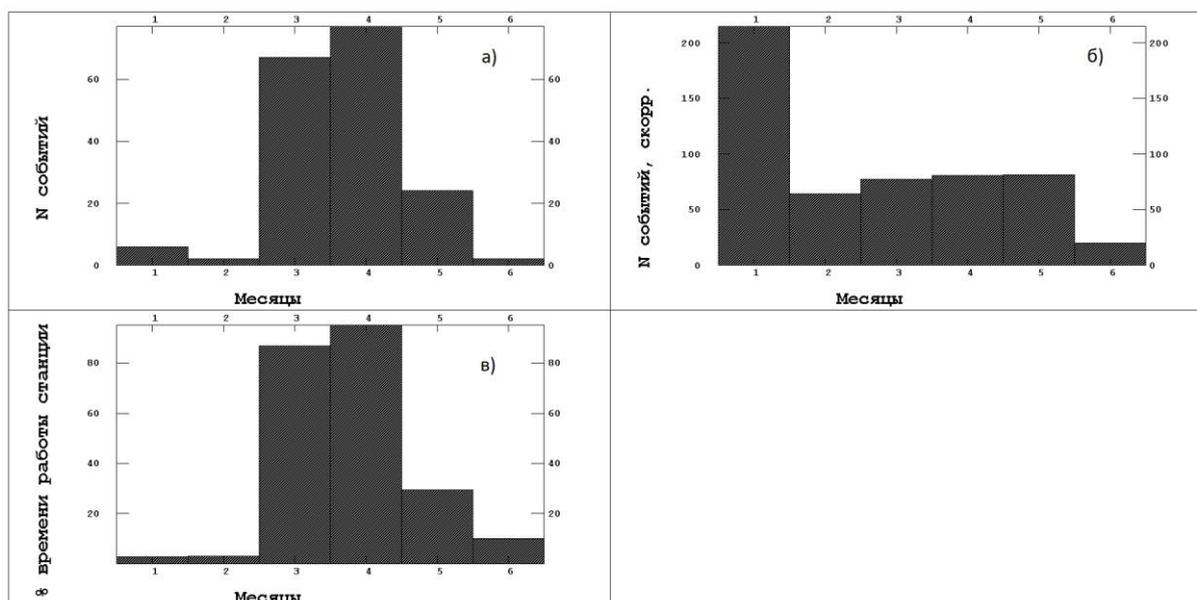


Рис. 9. а) Количество обнаруженных событий по месяцам; б) количество событий, скорректированное на время работы станции в данном месяце; в) процент времени работы станции по месяцам.

Поскольку в разные месяцы станция работала разное время, число наблюдаемых событий было скорректировано на время работы станции:

$$N_{\text{коррект}} = N_{\text{наблюденное}} \cdot \frac{100\%}{P}$$

где  $P$  – процент работы станции в данный месяц. Скорректированное количество событий по месяцам

показано на рисунке 9 б. Данные за январь не представительны, наблюдается некоторый спад активности в июне, хотя данных, чтобы сделать такое заключение достоверно, недостаточно.

Спектральный анализ наиболее сильных событий показал, что они отчетливо делятся на две группы (рис. 10).

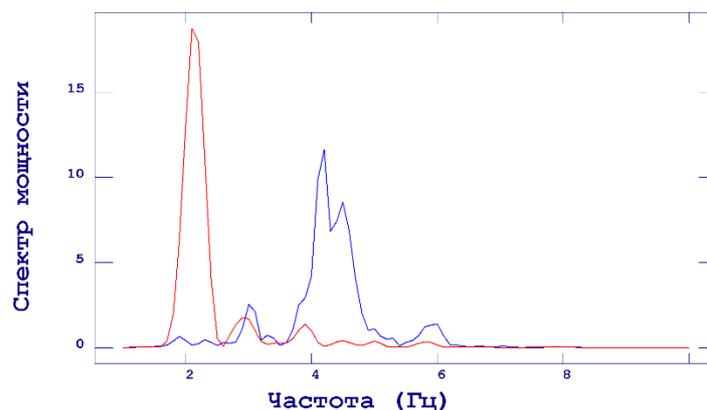


Рис. 10. Два типа спектров сейсмических событий (относительные единицы).

Первый тип событий – низкочастотные, пик спектральной мощности лежит в полосе от 1.5 до 2.5 Гц. У событий второго типа большая часть спектральной мощности лежит в полосе от 3 до 5 Гц. По-видимому, физические механизмы порождения этих событий различаются.

#### Заключение.

1. В результате обработки данных станции «Мерцбахер», расположенной в непосредственной близости от ледника Энгильчек, было выявлено большое количество слабых (средняя магнитуда 1.4) сейсмических событий, ассоциирующихся с активностью данного ледника.

2. По спектральному составу записей события разделяются на два типа (низкочастотные, с максимумом спектральной мощности в полосе 1.5-2.5 Гц и среднечастотные, с максимумом в полосе от 3 до 5 Гц). По-видимому, события разных типов порождены различными физическими причинами.

3. Неточность локации сейсмических событий по отдельной станции не позволяет сделать значимых заключений о пространственном распределении сейсмичности в данном районе.

4. Тем не менее, 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 поляризации азимутов. Лучшим вариантом, несомненно, будет установка нескольких станций вокруг изучаемого ледника.

5. Программное обеспечение, разработанное в Кольском филиале Геофизической службы РАН может с успехом быть применено для организации автоматической обработки данных системы мониторинга динамики ледников.

#### Литература:

1. Иныльчек. Большая Советская Энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е Изд. - М.: Советская Энциклопедия, 1969-1978 гг.
2. Энгильчек. Словарь современных географических названий / Русс. геогр. общ-во. Моск. центр; Под общей ред. акад. В.М. Котлякова. Институт географии РАН. - Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
3. Усупаев Ш.Э., Шакиров А.Э. Новые результаты площадной геофизической съемки плотинной грунтовой перемычки, разделяющей на две части прорывоопасное озеро Мерцбахера на леднике Энгилчек. В книге: Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики (издание 10 с измен. и допол.). - Б.: МЧС КР, 2013. - С. 629-631.
4. Айрапетьянц С.Э., Баков Е.К., Морфология ледникового озера Мерцбахера и механизм его катастрофических

- прорывов. Некоторые закономерности оледенения. Тянь-Шаня. - Фрунзе: Илим, 1971. - С. 75-84.
5. Ерохин С.А. Мониторинг прорывоопасных озер Кыргызстана. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Издание шестое с изменениями и дополнениями. - Б.: МЧС КР, 2009. - С. 570-583.
  6. Мачерет Ю.А., Никитин С.А., Бабенко А.Н., Веснин А.В., Боброва Л.И. Санкин Л.В. Толщина и строение ледника Южный Иньльчек по данным радиозондирования. Труды ИГАН СССР, 1992, С. 86-97.
  7. Results from the 2009 geoscientific expedition to the Inylchek Glacier, Central Tien Shan (Kyrgyzstan) Häusler, H., Leber, D., Scheibz, J., Копесну, А., Wetzell, H.-U., Echlter, H., and Moldobekov, B., 2010. Huang, H., 2005. Kargel, J. S., Abrams, M.J., Bishop, M.P., Bush, A., Hamilton, G., Jiskoot, H., Kääb, A., Kieffer, H.H., Lee, E.M., Paul, F., Rau, F., Raup, B., Shroder, J. F., Soltesz, D., Stainforth, D., Stearns, L. and Wessels, R., 2005. Khromova, T. E., Dyurgerov, M. B. and Barry, R. G., 2003. Loke, M.H., 2010.
  8. Орунбаев С.Ж., Усупаев Ш.Э. Геофизические измерения сейсмических шумов на леднике Южный Энльчек в районе высокогорного прорыво-опасного озера Мерцбахера. В книге: Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории КР (изд. 9 с изм. и доп.). - Б.: МЧС КР, 2012. - С. 672-674.
  9. Асминг В. Э., Федоров А.В. Возможности применения автоматического детектора-локатора сейсмических событий по одиночной станции для детальных сейсмологических наблюдений. Сейсмические приборы. - Москва, 2014. - Т.50. - №3. - С. 19-29.
  10. Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. - 2021. - Т. 3. - №1.