

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-53-63>

УДК 550.34.098: 551.324.63

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОТНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

А. Е. Шокпарбай*, Н. Н. Михайлова

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

* E-mail для контактов: shokparbai@list.ru

В последние годы криосейсмология стала важным направлением исследований, предоставляя новые возможности для изучения динамики ледников и их взаимодействия с климатическими изменениями. Эта междисциплинарная наука, объединяющая сейсмологию и гляциологию, открывает новые перспективы для анализа процессов в криосфере. В 2023 году в Национальном ядерном центре Республики Казахстан в рамках Программы целевого финансирования (ПЦФ) «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений» начались исследования ледников Тянь-Шаня сейсмическим и инфразвуковым методами. Установлены три временные сейсмические и инфразвуковая станции на казахстанской территории в 70–150 км от масштабных ледников высотного Тянь-Шаня. Дополнительно привлекались данные двух стационарных станций, расположенных на расстояниях 130 и 160 км от ледников: станции Шалкоде (130 км), которая входит в состав сети Национального научного центра сейсмических наблюдений и исследований Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан (ННЦНИ МЧС РК), и станции Подгорное (160 км), принадлежащей Институту геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК). Эти станции, размещенные на скальных основаниях, продемонстрировали высокую эффективность в регистрации слабых сигналов ледниковой активности. Исследования подтверждают значимость криосейсмологических подходов для анализа ледниковых процессов и их связи с изменениями климата.

Ключевые слова: ледниковые землетрясения, Тянь-Шань, криосейсмология, энергетический класс, магнитуда, сейсмические станции, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в мире начало развиваться новое направление исследований – криосейсмология, новый инструмент изучения динамики ледников. Криосейсмология – междисциплинарная наука, объединяющая два направления наук о Земле – сейсмологию и гляциологию. Сейсмические сигналы от широкого круга процессов, связанных с ледниками, заполняют довольно большой диапазон частот (от 10^{-3} до 10^2 Гц) и значительный интервал по магнитуде (от -3 до 7), что позволяет по-новому взглянуть на фундаментальные процессы в криосфере [1].

Ситуация с изучением ледников и процессов в них изменилась после открытия глобально детектируемых сейсмических событий, связанных со сбросом льда в океан [1, 2]. Первые работы Горана Экстрёма и др. были посвящены землетрясениям, связанным с обрушением ледников Гренландии.

Число научных исследований в этой области резко возросло, что привело к установке новых сейсмических сетей, написанию новых статей и докладов (рисунок 1). Мониторинг состояния и активности ледников имеет большое значение для наблюдений за изменениями климата планеты и влиянием этих процессов на окружающую среду. В последние годы использование криосейсмологии становится популярным подходом для изучения динамики ледников. По сейсмическим записям можно наблюдать процессы и делать выводы о внутреннем и подледниковом состоянии в ранее недоступных местах. Криосейсмо-

логия на основе регистрации сейсмических и инфразвуковых волн исследует процессы на границах «лед – океан» и «лед – земная поверхность».

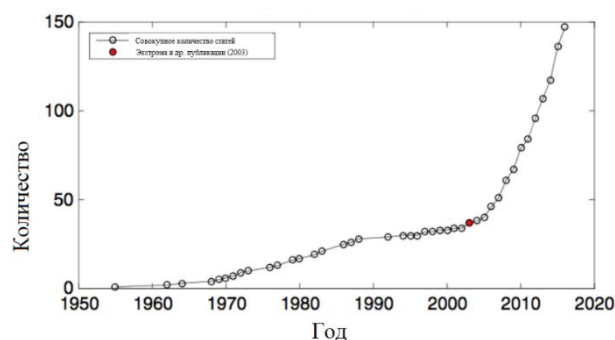


Рисунок 1. Общее количество статей по пассивной ледниковой сейсмичности, 1950–2016 гг. (из работы [3]). Красной точкой показан момент выхода статьи Г. Экстрёма.

Самая значительная часть криосейсмологических исследований связана с арктической зоной. Значительно меньше исследований проводилось в континентальных горных районах. Одним из основных процессов, вызывающих ледниковые землетрясения, является образование трещин/расселин на поверхности ледника. Обычно магнитуда M_w таких событий не превышает 1 [4]. Изучение этих событий дает ценную информацию о степени устойчивости ледника на местности. Второй механизм связан с течением ледника, непрерывным или дискретным, с которым так-

же связано образования сейсмических волн. Как правило, эти события имеют магнитуду $M_w \sim 3$ [5, 6].

Сейсмический метод изучения не только дает нам важный инструмент для понимания как ледник взаимодействует с окружающей средой, но и для мониторинга стабильности ледников.

В Центральной Азии по горным районам Памира и Тянь-Шаня почти нет работ по криосейсмологии, хотя хорошо известно, что здесь находится большое количество масштабных ледников. Особенно интересным представляется изучение ледника Энгильчек в области высотного Тянь-Шаня. В последние годы внимание к исследованию этого ледника было уделено в работе, проводимой сотрудниками Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ, Бишкек, Кыргызстан) совместно с Немецким центром исследований Земли (GFZ), Потсдам, Германия. В 2019 г. появилась статья Усупаева, Асминга В.Е., и др. «О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгильчек в бассейне реки Сары-Джаз Киргизского Тянь-Шаня» [7]. На леднике была установлена сейсмическая станция «Мерцбахер», по записям которой был выявлен ряд сейсмических событий, ассо-

циируемых с активностью ледников. По одной станции Мерцбахер за два месяца март и апрель 2018 года обнаружено 179 событий, магнитуда от 0,9 до 2,5. По спектрам наиболее сильных событий все они были разделены на две группы: с преобладающими частотами 1,5–2,5 Гц и 3–5 Гц.

Но первой работой по Центральной Азии в изучении ледовых землетрясений горных ледников была работа авторов из Центра данных ИГИ НЯЦ РК Михайловой Н. Н и Комарова И. И [8]. В этой работе авторы анализировали большое количество однообразных по волновой картине записей событий, практически ежедневно наблюдающихся по данным тогда недавно открытой сейсмической группы Маканчи (рисунок 2). Авторами определены азимуты и расстояния до источника. Все события локализовались в области ледников высотного Тянь-Шаня (рисунок 3). Были изучены графики повторяемости этих событий, их суточные и сезонные вариации. Была высказана версия, что эти события являются сейсмическими проявлениями ледниковых процессов. Других прецедентов в описании подобных явлений даже по мировым литературным данным по горным ледникам в то время не было.

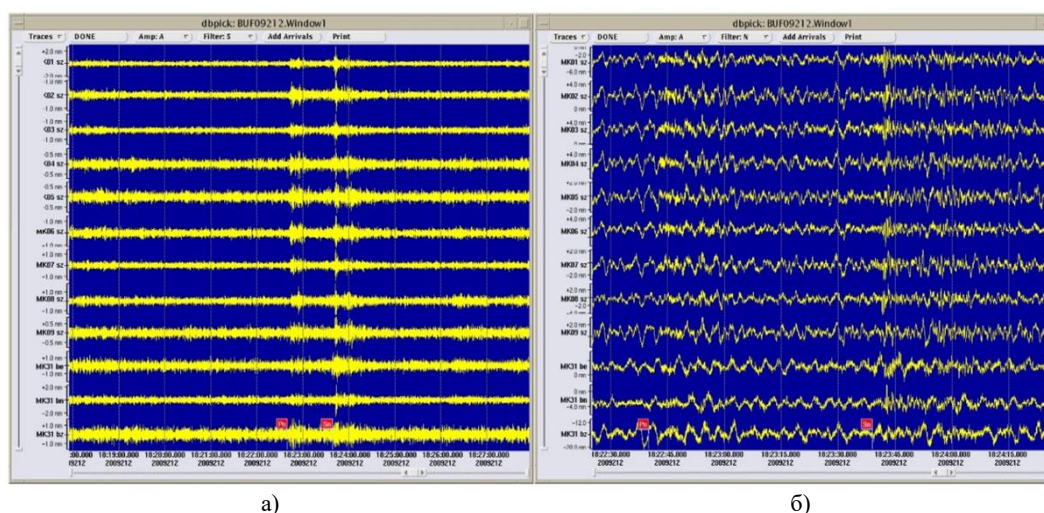


Рисунок 2. Вид записей исследуемых событий, регистрируемых станцией PS23-Маканчи (MKAR): а – обзорная; б – отдельная запись события всеми элементами группы [8]

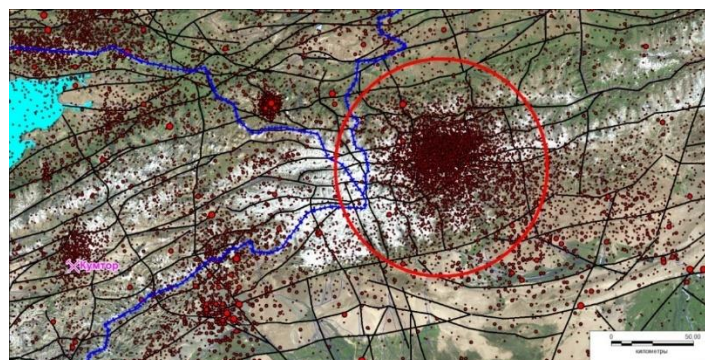


Рисунок 3. Эпицентры землетрясений в районе высотного Тянь-Шаня (около 2000 событий) по данным станции MKAR (Маканчи) за 2004 – 2008 гг. на геоморфологической карте [8].

1. СОЗДАНИЕ ВРЕМЕННОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ВБЛИЗИ ЛЕДНИКА

В 2023 г. в НЯЦ РК начались работы по ПЦФ «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения изменений климата». В этой программе одна из задач «Оценка влияния климатических изменений на режим проявления ледотрясений, отражающих процесс таяния масштабных ледников Тянь-Шаня, по сейсмическим и инфразвуковым данным» непосредственно касается исследований криосферы. В рамках этих работ в конце 2023 г. были проведены первые полевые работы с установкой временных сейсмических и инфразвуковой станции. Общая схема расположения временных сейсмических станций относительно ледников показана на рисунке 4.

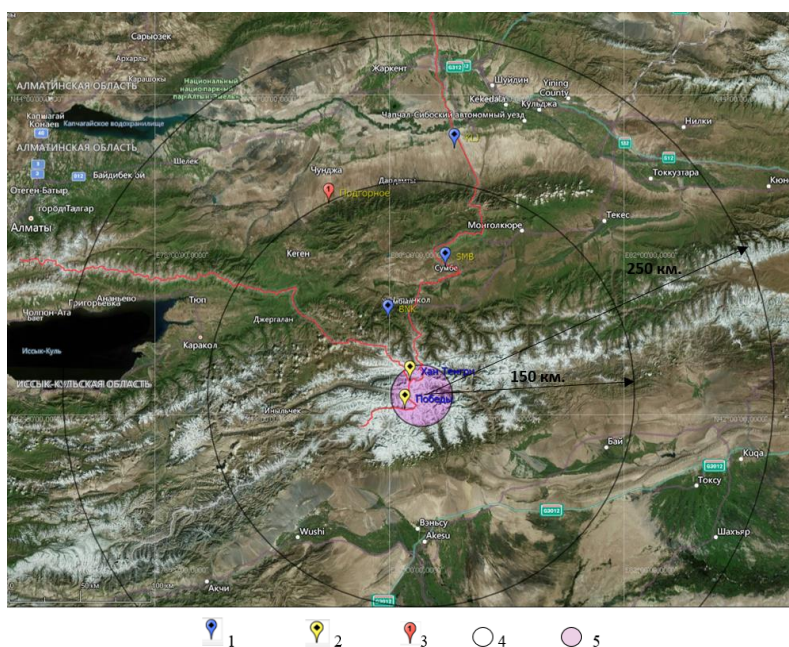
На полевых станциях была установлена следующая аппаратура: сейсмометр CM640-T (Guralp, Анг-

лия); дигитайзер DAS 6501 (ПМД, Канада); микробарометр MB 2005 (Seismo Wave, Франция);

На рисунке 5 показан общий вид места расположения аппаратуры. В таблице 1 представлены координаты расположения сейсмических и инфразвуковой станции. Уже первый анализ полученных данных позволил обнаружить на записях целевые сейсмические сигналы, ассоциированные как ледниковые события (рисунки 6–9).

Таблица 1. Координаты расположения сейсмо-инфразвукового комплекса

Название станции (код)	Координаты		
	С.Ш., °	В.Д., °	Высота над уровнем моря, м
Калжат (KLJ)	43,666657	80,556309	751
Сумбе (SMB)	42,92819	80,47845	1826
Баянкол (BNK)	42,599319	79,988804	2241



- 1 – места установки сейсмо-инфразвукового оборудования; 2 – пики Победы и Хан-Тенгри; 3 – сейсмостанция «Подгорное»; 4 – окружности на расстоянии 150 и 250 км от центра ледника; 5 – район наиболее высоких пиков Тянь-Шаня

Рисунок 4. Общая схема расположения района работ и места расстановки сейсмо-инфразвуковых приборов



Рисунок 5. Общий вид места расположения записывающей аппаратуры, сейсмометра и микробарометра

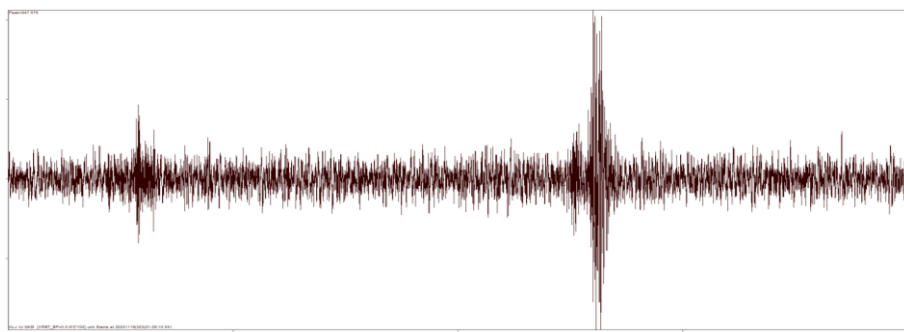


Рисунок 6. Запись инфразвуковой станцией Калжат (KLJ) события (01:29 19.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

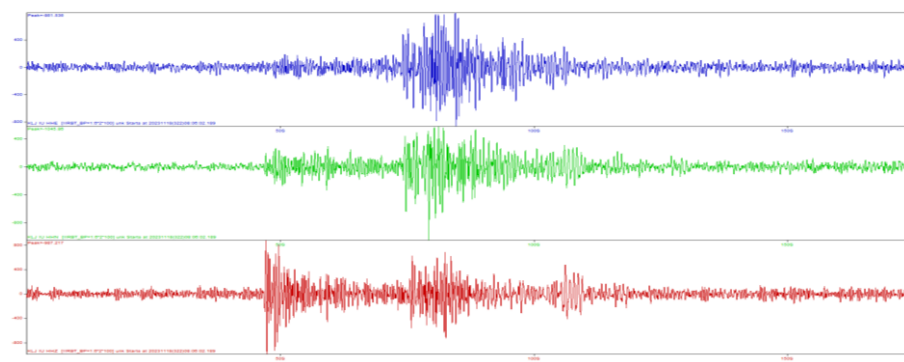


Рисунок 7. Запись сейсмической станцией Калжат (KLJ) события (08:05 18.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

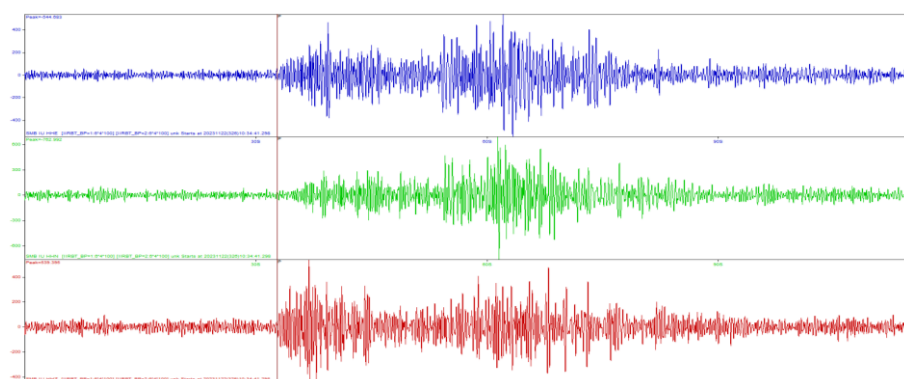


Рисунок 8. Запись сейсмической станцией Сумбе (SMB) события (08:05 18.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

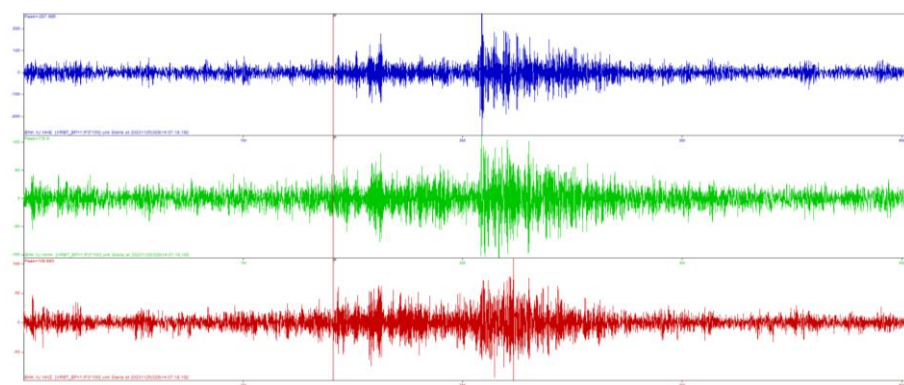


Рисунок 9. Запись сейсмической станцией Баянкол (BNK) события (14:07 25.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки полученных данных использовались различные подходы, включая автоматическую и ручную обработку.

2.1 Автоматическая обработка данных

Для автоматической обработки применялась система NSDL, позволяющая детектировать и проводить

локализацию событий [9]. На рисунке 10 показан пример обнаружения сигналов по станции Калжат и поиска местоположения эпицентра автоматической системой обработки NSDL. Всего по трем полевым станциям, проработавшим с 17 по 25 ноября 2023 г., найдено и локализовано 17 событий (таблица 2). Их эпицентры приурочены к зоне основных ледников Тянь-Шаня (рисунок 11).

Таблица 2. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения по трем станциям

№	Дата	Время	Координаты		Название станции (код)
			С.Ш., °	В.Д., °	
1	17.11.2023	13.28:32.4	42,089	79,742	Калжат (KLJ)
2	17.11.2023	14.34:08.8	42,027	80,672	Калжат (KLJ)
3	17.11.2023	15.27:31.9	42,000	80,595	Калжат (KLJ)
4	17.11.2023	16.38:27.4	42,188	80,591	Калжат (KLJ)
5	17.11.2023	19.51:13.2	41,988	79,952	Калжат (KLJ)
6	17.11.2023	23.23:05.8	42,089	80,295	Калжат (KLJ)
7	21.11.2023	11.04:24.1	42,315	79,735	Сумбе (SMB)
8	21.11.2023	11.18:46.0	42,132	80,746	Сумбе (SMB)
9	21.11.2023	12.14:10.5	42,305	80,688	Сумбе (SMB)
10	21.11.2023	12.37:23.4	42,150	80,645	Сумбе (SMB)
11	21.11.2023	19.31:57.5	41,914	80,843	Сумбе (SMB)
12	22.11.2023	2.40:43.2	42,120	80,853	Сумбе (SMB)
13	22.11.2023	7.39:54.1	42,099	80,655	Сумбе (SMB)
14	22.11.2023	17.34:57.4	42,205	80,796	Сумбе (SMB)
15	23.11.2023	3.41:27.8	42,049	79,590	Сумбе (SMB)
16	24.11.2023	06.46:02.1	42,235	80,262	Баянкол (BNK)
17	25.11.2023	00.26:22.6	42,061	80,025	Баянкол (BNK)

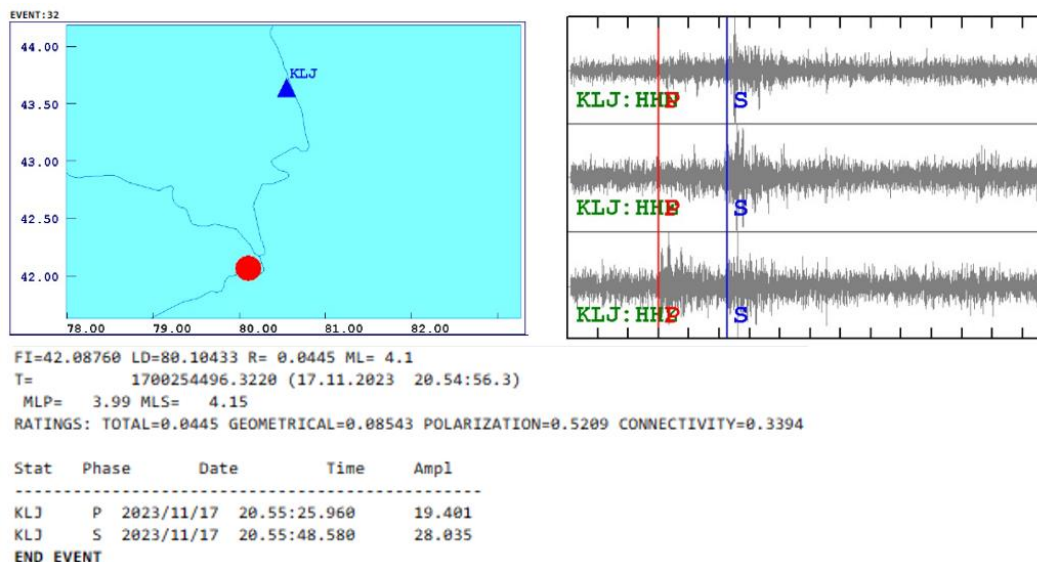


Рисунок 10. Пример детектирования, локализации сейсмического события и его основные параметры, полученные в системе NSDL. Станция Калжат

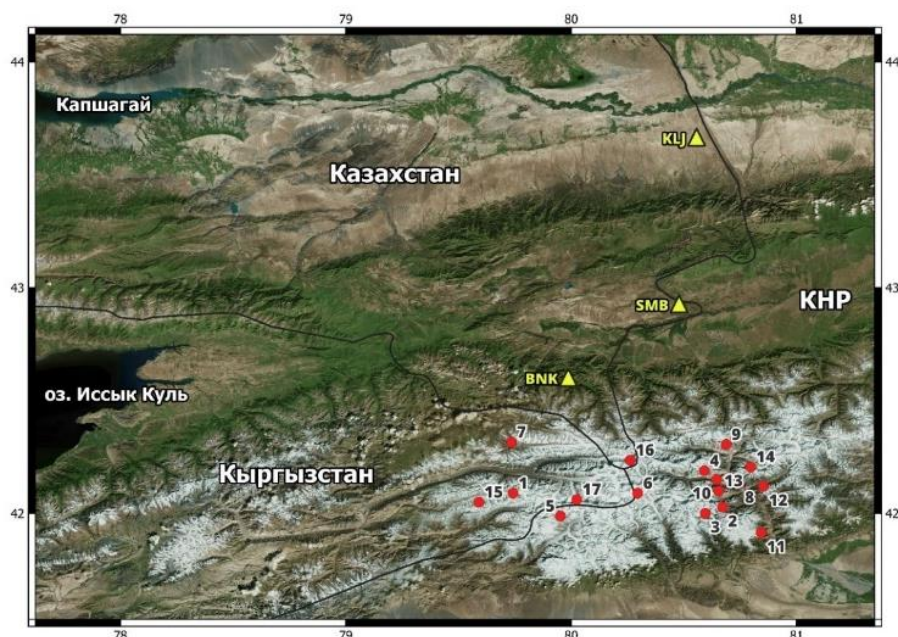


Рисунок 11. Карта эпицентров сейсмических событий (●), ассоциированных с ледниками по данным полевых станций (▲)

2.2 Обработка данных полевых и стационарных станций ближней зоны

На втором этапе для повышения точности локализации к данным полевых станций были добавлены данные двух стационарных станций. Это станция Подгорное (PDGK) сети ИГИ НЯЦ РК и Шалкоде (SHLS) сети ННЦСНИ МЧС РК. Станция Подгорное (PDGK) расположена на расстоянии 160 км от ледника, а станция Шалкоде (SHLS) – на расстоянии 130 км. Аппаратура на обеих станциях установлена на скальном основании, что делает их очень эффективными в регистрации слабых сигналов от ледников. На рисунке 12 показаны записи станции Подгорное

ное (PDGK) и Шалкоде (SHLS), на которых четко выражены сигналы от ледниковых землетрясений. Станция Калжат, расположена на расстоянии 140 км от ледника, Сумбе – 70 км и Баянкол – 60 км. Для обработки данных использовались программы из пакета DATASCOPE, в частности, dbpick и dbloc2. В результате анализа и обработки записей были зарегистрированы 33 землетрясения с эпицентрами в зоне ледника. Диапазон магнитуд m_{lv} [10] зарегистрированных землетрясений составляет 2,5–3,5, а энергетических классов R [11] – 6,1–7,9. Карта эпицентров локализованных событий представлена на рисунке 13.

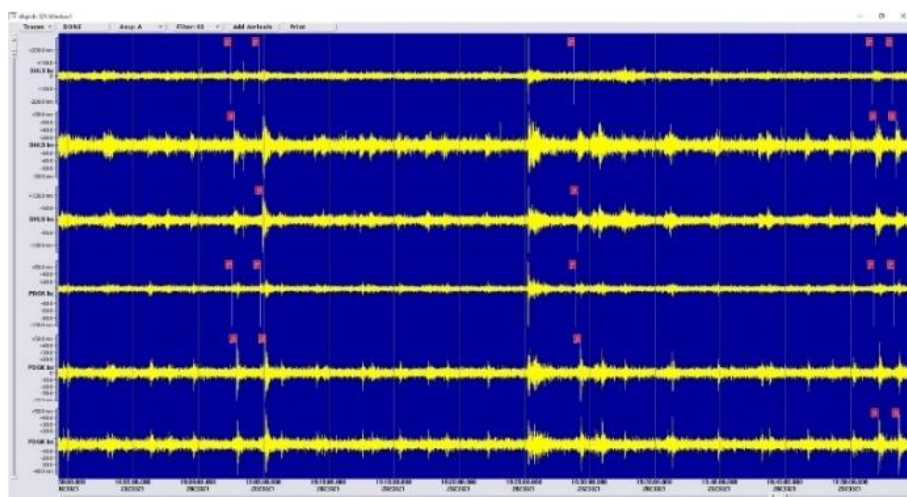


Рисунок 12. Вид записей с сигналами от ледниковых землетрясений по станциям Шалкоде и Подгорное. Верхние трассы – три компоненты записи Шалкоде, нижние – три компоненты станции Подгорное

Таблица 3. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения, по данным полевых и стационарных станций ближней зоны

№	lat	lon	date	j/day	time	mpv	K
1	42,0064	80,5974	11/17/2023	321	12:26:20	2,7	7,28
2	41,8880	80,7306	11/17/2023	321	13:06:23	2,69	6,88
3	42,0239	80,8093	11/17/2023	321	13:28:33	2,77	6,72
4	41,9051	80,6288	11/17/2023	321	13:47:46	2,97	7,04
5	42,0841	80,5417	11/17/2023	321	17:45:12	2,73	6,74
6	42,1438	80,7125	11/17/2023	321	18:31:29	2,68	6,87
7	42,1385	80,6743	11/17/2023	321	19:02:05	2,76	6,93
8	42,0868	80,5278	11/17/2023	321	19:51:16	2,73	6,93
9	42,1883	80,6280	11/17/2023	321	20:09:07	2,84	7,01
10	42,2405	80,7638	11/18/2023	322	13:52:32	2,95	7,32
11	42,2267	80,6109	11/18/2023	322	00:33:41	3,05	7,46
12	42,1247	80,5641	11/18/2023	322	15:05:54	2,62	6,78
13	42,1751	80,5736	11/18/2023	322	16:10:43	3,23	7,41
14	41,8620	79,6956	11/18/2023	322	16:49:33	2,95	7,44
15	42,0887	80,6087	11/18/2023	322	23:02:19	3,04	7,52
16	42,2404	80,8142	11/18/2023	322	22:31:46	3,08	7,67
17	42,1757	80,5613	11/18/2023	322	23:29:00	2,84	7,37
18	42,1731	80,6991	11/18/2023	322	23:32:19	3,1	7,8
19	42,2312	80,6016	11/18/2023	322	16:06:36	2,72	6,95
20	42,1555	80,6216	11/18/2023	322	17:30:53	2,6	6,36
21	42,2268	80,5680	11/18/2023	322	18:44:07	2,84	6,79
22	42,1238	80,6372	11/18/2023	322	23:12:24	3,02	7,47
23	42,0423	80,5018	11/19/2023	323	00:37:22	2,98	7,92
24	42,1995	80,7940	11/21/2023	325	20:23:51	2,56	6,4
25	42,3096	80,9567	11/21/2023	325	22:51:12	2,64	7,3
26	42,2559	80,9272	11/22/2023	326	18:38:33	2,73	6,85
27	42,2924	80,8146	11/24/2023	328	18:19:02	2,66	6,56
28	42,1921	80,8621	11/24/2023	328	20:50:36	2,57	6,56
29	42,2738	80,8036	11/25/2023	329	00:03:47	2,55	6,51
30	41,9832	81,0106	11/25/2023	329	16:23:26	3,51	6,1
31	41,9356	79,5466	11/25/2023	329	19:06:27	3,12	7,45
32	42,2681	80,8211	11/25/2023	329	20:04:57	3	7,5
33	42,2453	80,8940	11/26/2023	330	05:30:25	2,56	6,42

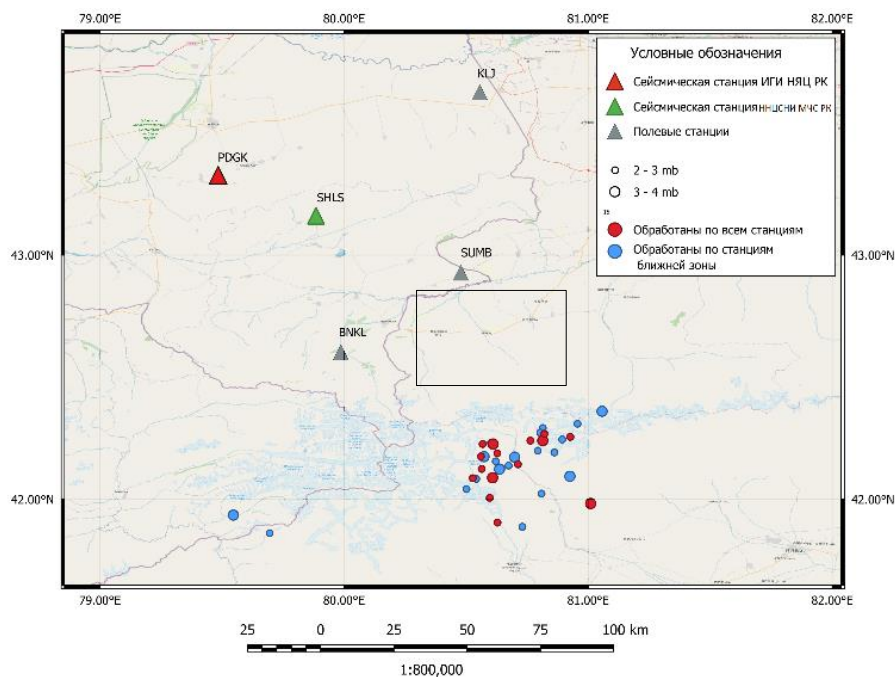


Рисунок 13. Карта расположения станций ближней зоны и эпицентров зарегистрированных землетрясений

2.3 Совместная обработка и анализ данных станций ближней и дальней зоны

Далее в задачи настоящей работы входило изучение того, какие из зарегистрированных станциями ближней зоны событий регистрируются сейсмической группой Маканчи, находящейся на расстоянии более 550 км от ледника. Из 33 событий, обнаруженных и локализованных по станциям ближней зоны (таблица 3), 15 событий зарегистрированы также и сейсмической группой Маканчи. Установлено, что большинство событий с энергетическим классом не меньше 6,1 регистрируются далекой сейсмической группой Маканчи. То есть, версия, высказанная в статье [8] в 2009 г. о том, что группа Маканчи регистри-

рует и может локализовать именно ледниковые события, становится доказанной. На рисунке 14 приведены записи ледникового землетрясения 25 ноября 2023 г. в 16 h 23 m, зарегистрированного станциями ближней зоны и сейсмической группой Маканчи. Проведен анализ значений азимутов на источник, полученных по группе Маканчи на основе F-k анализа, а также на основе результатов локализации по станциям ближней зоны. Диапазоны этих азимутов практически совпадают (таблица 4). На рисунке 15 приведена карта эпицентров, полученных по данным станций ближней зоны и совместно с сейсмической группой Маканчи. Эпицентры расположены очень близко между собой.

Таблица 4. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения по сейсмической группе Маканчи

№	Дата	j/day	T ₀	φ	λ	МКАР A _z - F-k (Sn волны)	МКАР A _z – расчет	R, км от МКАР
1	11/17/2023	321	12:26:20	42,0064	80,5974	186,2	194,823	560
2	11/17/2023	321	13:47:46	41,9051	80,6288	182,9	194,291	524
3	11/17/2023	321	18:31:29	42,1438	80,7125	186,3	194,214	547
4	11/17/2023	321	19:51:16	42,0868	80,5278	191,6	195,639	542
5	11/17/2023	321	20:09:07	42,1883	80,6280	192,5	195,073	542
6	11/18/2023	322	13:52:32	42,2405	80,7638	188,4	194,028	547
7	11/18/2023	322	00:33:41	42,2267	80,6109	196,6	195,335	542
8	11/18/2023	322	15:05:54	42,1247	80,5641	186,8	195,440	547
9	11/18/2023	322	23:02:19	42,0887	80,6087	191,2	194,955	551
10	11/18/2023	322	22:31:46	42,2404	80,8142	186,3	193,580	542
11	11/18/2023	322	23:29:00	42,1757	80,5613	184,5	195,614	497
12	11/18/2023	322	18:44:07	42,2268	80,5680	188,3	195,710	529
13	11/22/2023	326	18:38:33	42,2559	80,9272	189,3	192,609	538
14	11/25/2023	329	16:23:26	41,9832	81,0106	192,3	191,251	542
15	11/25/2023	329	20:04:57	42,2681	80,8211	187,1	193,592	542

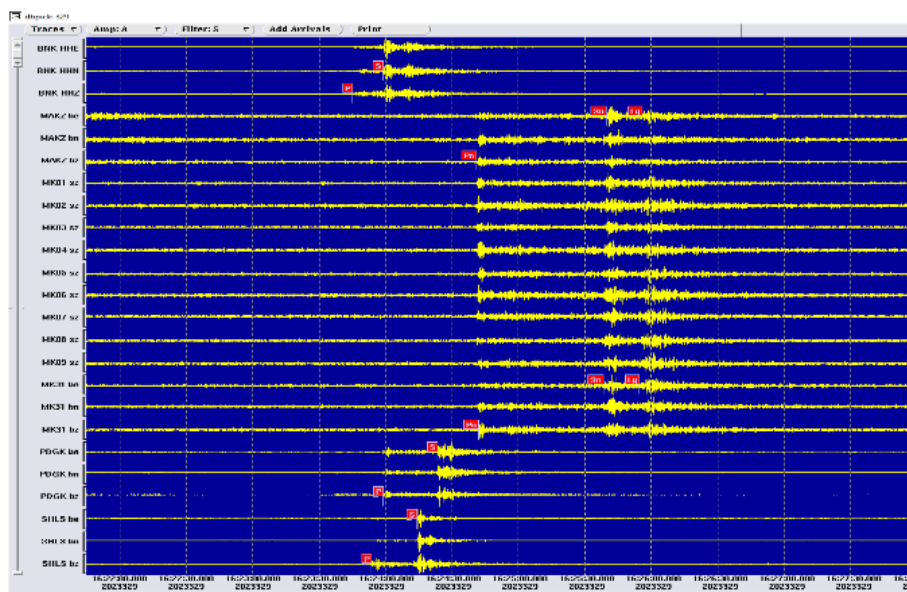


Рисунок 14. Записи ледникового землетрясения станциями ближней зоны и группой Маканчи, энергетический класс 6,1

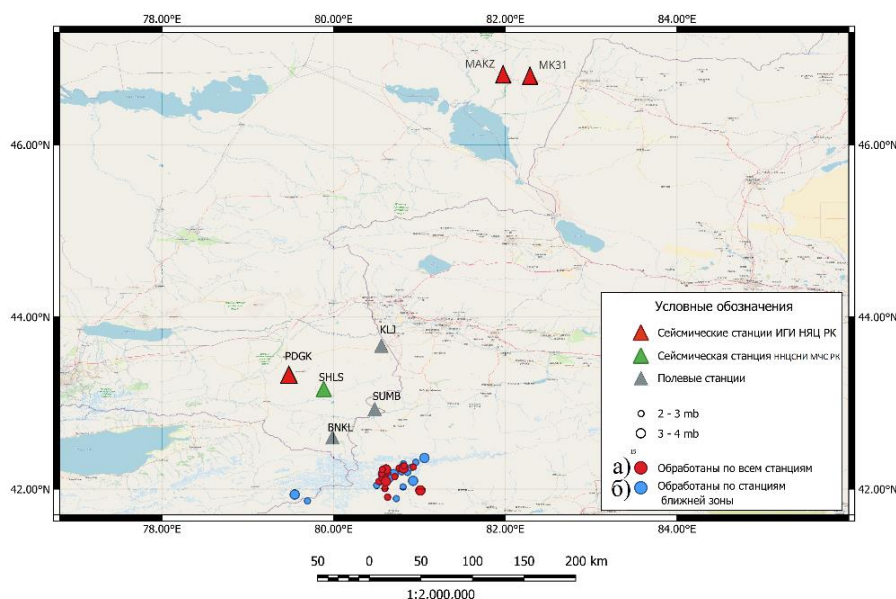


Рисунок 15. Расположение станций ближней зоны и сейсмической группы Маканчи (MKAR) и эпицентров землетрясений в ледниковой зоне, полученных: а) совместно станциями ближней зоны с сейсмической группой Маканчи; б) только по станциям ближней зоны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что высказанная в 2009 году [8] версия о том, что множество сигналов, регистрируемых станциями Маканчи с одного и того же азимута, являются событиями ледниковой природы, убедительно подтвердилась. Сейсмическая группа Маканчи регистрирует практически все события с энергетическим классом более 6 на расстоянии более 500 км с эпицентрами в зоне масштабных ледников. Следовательно, имея материал по группе Маканчи за более, чем 20 лет (станция открыта в 2001 г.), мы можем провести изучение закономерностей проявления режима ледников по активности событий, вариаций их количества, спектрального состава, распределения событий по площади ледника под воздействием климатических изменений.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881915 «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата».

ЛИТЕРАТУРА

- 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>
- 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>
- E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // Reviews of Geophysics. – 2016. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
- А. В. Федоров, В. Э. Асминг. Низкочастотные землетрясения архипелага Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена // Материалы международной научной конференции. Мурманск, 1–3 ноября, 2012 г. – М., – 2012. – Вып.11. – С. 249–253.
- Kanao, M. A Decade of Advances in Cryoseismology // Polar Seismology. – 2018a – Advances and Impact. IntechOpen.
- Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment // Polar Seismology. – 2018b. – Advances and Impact, 75.
- 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.
- 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.
- Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В., Евтюгина З. А. Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. – 2017. – С. 33–36.
- Михайлова Н. Н., Неверова Н. П. Калибровочная функция $\sigma(\Delta)$ для определения MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Наука. – 1986. – С. 41–48.

11. Раутиан Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР). – М.: Наука. – 1964. – № 32 (199). – С. 88–93.

REFERENCES

1. 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>
2. 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>
3. E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // Reviews of Geophysics. – 2016. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
4. A. V. Fedorov, V. E. Asming. Nizkochastotnye zemletryaseniya arhipelaga Shpitsbergen // Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Murmansk, 1–3 noyabrya, 2012 g. – Moscow, – 2012. – Issue 11. – P. 249–253.
5. Kanao, M. A Decade of Advances in Cryoseismology // Polar Seismology. – 2018a – Advances and Impact. IntechOpen.
6. Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment // Polar Seismology. – 2018b. – Advances and Impact, 75.
7. Usupaev Sh. E., Asming V. E., Sharshebaev A. K., Altynbek uulu T., Rakhmatilla uulu Z., Anarkulov B. A. O zemletryaseniakh glyatsiotektonicheskogo kharaktera gornyx stran na primere lednika Engilchek v bassejne reki Sary-Dzhaz Kyrgyzskogo Tyan'-Shanya // Izvestiya VUZov Kyrgyzstana. – 2019. – Vol. 12. – P. 40–49.
8. Mikhaylova 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.)
9. Asming V. E., Fedorov A. V., Prokudina A. V., Evtyugina Z. A. Avtomaticheskaya sistema monitoringa regional'noy seysmichnosti NSDL. Printsipy postroeniya i nekotorye rezul'taty ispol'zovaniya // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy XII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly / Otv. red. A. A. Malovichko. – Obninsk: FITs EGS RAN. – 2017. – P. 33–36.
10. Mikhaylova N. N., Neverova N. P. Kalibrovochnaya funktsiya $\sigma(\Delta)$ dlya opredeleniya MPVA zemletryaseni Severnogo Tyan'-Shanya // Kompleksnye issledovaniya na Alma-Atinskoy prognosticheskoy poligone. – Alma-Ata: Nauka. – 1986. – P. 41–48.
11. Rautian T. G. Ob opredelenii energii zemletryaseni na rasstoyanii do 3000 km // Eksperimental'naya seysmika. (Trudy IFZ AN SSSR). – Moscow: Nauka. – 1964. – Vol. 32 (199). – P. 88–93.

БИІК ТЯНЬ-ШАНЬДАҒЫ МҰЗДЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН СЕЙСМОЛОГИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

А. Е. Шокпарбай*, Н. Н. Михайлова

ҚР ҰҰО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: shokparbai@list.ru*

Соңғы жылдары криосейсмология мұздықтардың динамикасын және олардың климаттық өзгерістермен өзара әрекеттесуін зерттеуге жаңа мүмкіндіктер бере отырып, зерттеудің маңызды бағытына айналды. Сейсмология мен гляциологияны біріктіретін бұл пәнаралық ғылым криосферадағы процестерді талдауға жаңа перспективалар ашады. 2023 жылы Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығында "Климаттық өзгерістерді бағалау үшін ядролық, сейсмикалық және инфрадыбыстық әдістерді қолдану" нысаналы қаржыландыру бағдарламасы (НҚБ) шеңберінде Тянь-Шань мұздықтарын сейсмикалық және инфрадыбыс әдістермен зерттеу басталды. Биік Тянь-Шаньның ауқымды мұздықтарынан 70–150 км қашықтықта Қазақстан аумағында үш уақытша сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялар орнатылды. Мұздықтардан 130 және 160 км қашықтықта орналасқан екі стационарлық станцияның деректері қосымша пайдаланылды: Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар министрлігінің сейсмологиялық байқау және зерттеулер ұлттық ғылыми орталығының (ҚР ТЖМ СБЗҰО) құрамына кіретін Шалқоде станциясы (130 км) және Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Геофизикалық зерттеулер институтына (ҚР ҰҰО ГЗИ) тиесілі Подгорное станциясы (160 км). Жартас негіздеріне орналастырылған бұл станциялар әлсіз мұздық белсенділік сигналдарын тіркеуде жоғары тиімділікті көрсетті. Зерттеулер мұздық процестерді және олардың климаттың өзгеруімен байланысын талдау үшін криосейсмологиялық тәсілдердің маңыздылығын растайды.

Түйінді сөздер: мұздық жер сілкінісі, Тянь-Шань, криосейсмология, энергетикалық класс, магнитуда, сейсмикалық станциялар, мониторинг.

SEISMOLOGICAL STUDIES OF GLACIAL PROCESSES IN THE HIGH-ALTITUDE TIEN SHAN

A. E. Shokparbai^{*}, N. N. Mikhailova

Branch “Institute of Geophysical Research” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: shokparbai@list.ru*

In recent years, cryoseismology has become an important area of research, providing new opportunities to study the dynamics of glaciers and their interaction with climate change. This interdisciplinary science, combining seismology and glaciology, opens up new perspectives for the analysis of processes in the cryosphere. In 2023, research of the Tien Shan glaciers using seismic and infrasound methods began at the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan within the framework of the Targeted Financing Program (TFP) “Application of nuclear, seismic and infrasound methods for assessing climate change.” Three temporary seismic and infrasound stations have been installed in Kazakhstan, 70–150 km from the large-scale glaciers of the high-altitude Tien Shan. Additionally, data from two stationary stations located at distances of 130 and 160 km from glaciers were used: the Shalkode station (130 km), which is part of the network of the National Scientific Center for Seismic Observations and Research of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan (NSCSOR MES RK), and the Podgornoye station (160 km), owned by the Institute of Geophysical Research The National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (IGR NNC RK). These stations, located on rocky foundations, have demonstrated high efficiency in recording weak signals of glacial activity. Research confirms the importance of cryoseismological approaches for analyzing glacial processes and their relationship to climate change.

Keywords: *glacial earthquakes, Tien Shan, cryoseismology, energy class, magnitude, seismic stations, monitoring.*