

УДК 550.34

## ЛЕДНИКОВЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Михайлова Н.Н., Комаров И.И.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

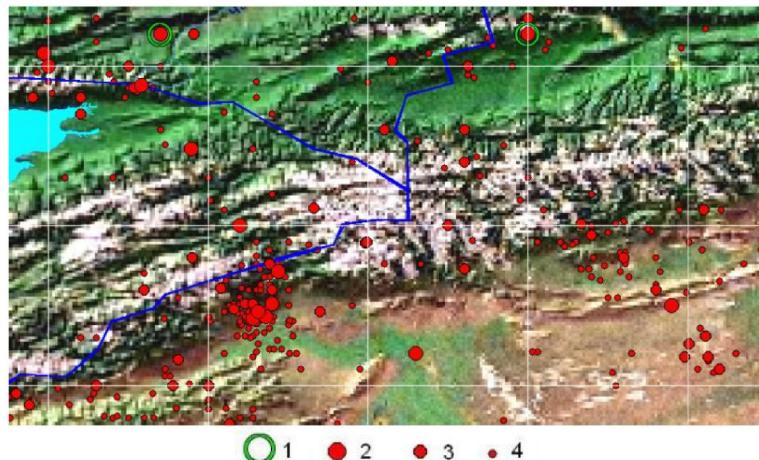
Впервые обсуждается связь большого числа слабых землетрясений, регистрируемых станциями сети НЯЦ РК, в первую очередь, сейсмической группой PS23-Маканчи, с ледниками, занимающими огромные площади высотного Тянь-Шаня на территории Китая вблизи границ с Кыргызстаном и Казахстаном. Установлены суточные и сезонные вариации количества ледниковых землетрясений, увеличение количества таких землетрясений в последние годы, что предположительно связывается с процессами интенсивного сокращения площади ледников в этом районе мира.

Статья 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 на 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 меридiana  $79^{\circ}$ в.д. и имеет протяженность с запада на восток (между параллелями  $41^{\circ}$  и  $43^{\circ}$  градуса с.ш.) несколько сот километров.

Рассматриваемый район является высоко сейсмоактивным. Существующие сети сейсмических наблюдений на территории бывшего СССР регистрировали землетрясения в этом районе, начиная с 30-х годов прошлого столетия. Начиная с 1960 г. и до примерно 2000 г. сетями аналоговых станций, созданными в Казахстане и Кыргызстане для детальных сейсмических наблюдений на Северном Тянь-Шане, без пропуска регистрировались землетрясе-

ния с магнитудой  $mb \geq 4,0$  (энергетический класс  $K \geq 9$ ). Все зарегистрированные здесь землетрясения произошли в земной коре – глубины их очагов не превышают 60 км. Абсолютное большинство землетрясений имеют глубины менее 30 км. Следует отметить, что из-за одностороннего расположения сейсмических станций и редкой сети наблюдений определение глубин всегда проводилось с большой ошибкой. На рисунке 1 приведена карта эпицентров исторических землетрясений за период с исторических времен до 2005 г.

Наиболее сильные землетрясения – сейсмические катастрофы, – произошли на севере изучаемой территории в 1716 г. и 1889 г. Землетрясение 1716 г. на территории Китая имело магнитуду  $M=7,5$ . Землетрясение 1889 г. на территории Казахстана хорошо известно как катастрофическое Чиликское землетрясение с  $Ms=8,3$ . Сильнейшим в высотной части Тянь-Шаня было землетрясение с  $Ms=6,6$ , эпицентр которого находился в одной зоне с другими событиями, имевшими магнитуду порядка 6. В самой высокой части Тянь-Шаня, приблизительно там, где сходятся границы трех государств, сильных землетрясений практически не наблюдалось.



Эпицентры землетрясений с магнитудой: 1 –  $Ms \geq 7,1$  (катастрофические); 2 –  $(7,0 \geq Ms \geq 6,1)$ ; 3 –  $(6,0 \geq Ms \geq 5,1)$ ; 4 –  $(5,0 \geq Ms \geq 4,0)$

Рисунок 1. Высотный Тянь-Шань. Эпицентры землетрясений с магнитудой более 4 с исторических времен до 2000 г.

Ситуация с регистрацией слабых землетрясений в данном районе изменилась с вводом в строй новых станций на территории Казахстана – станций сети Национального ядерного центра РК [1] и созданием Центра данных в г. Алматы для обработки и анализа данных станций этой сети.

Первой новой станцией стала ближайшая к рассматриваемой территории сейсмическая группа PS23-Маканчи в Восточном Казахстане. Станция входит в число первичных станций Международной системы мониторинга (MCM), создаваемой Организацией Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Сейсмическая группа PS23-Маканчи состоит из девяти скважинных однокомпонентных вертикальных приборов и двух трехкомпонентных станций – скважинной и поверхностной (рисунок 2). Глубина размещения сейсмометров в скважинах от 30 до 60 м. Режим регистрации непрерывный. Регистрация сигналов – цифровая. Количество отсчетов в секунду стандартно для всех каналов и составляет 40. В качестве однокомпонентных сейсмометров используются скважинные сейсмометры GS-21. У трехкомпонентных станций используются скважинные широкополосные сейсмометры KS 54000 и поверхностные GS-13. Апертура сейсмической группы 4 км. ([www.kndc.kz](http://www.kndc.kz)).

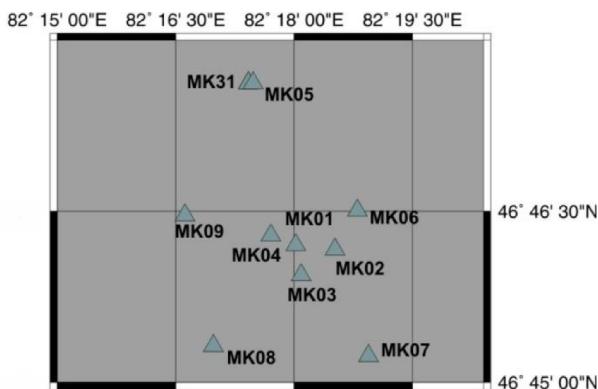


Рисунок 2. Сейсмическая группа PS23-Маканчи.  
Схема расположения элементов

Информация с сейсмометров по радиотелеметрическим каналам передается в центральный пункт сбора информации станции PS23-Маканчи, откуда по спутниковому каналу - в Центр данных (г. Алматы). В Центре проводится полная обработка данных: автоматическое детектирование сигналов по вертикальной компоненте записей всех элементов группы; определение азимута и кажущейся скорости сигнала с применением метода частотно-волнового анализа (f-k analysis); локализация источника; определение магнитуды и энергетического класса события. С 2003 г. систематически составляется сейсмологический бюллетень событий в оперативном режиме, доступный пользователям на веб-сайте Центра [www.kndc.kz](http://www.kndc.kz).

Уже начиная со времени обработки первых данных станции PS23-Маканчи, аналитики Центра столкнулись с необычными событиями, имевшими место практически каждый день. Их записи по волновой картине очень похожи друг на друга, такие события наблюдались по нескольку, а то и по несколько десятков раз в день. Обычно – это слабые события, которые может выделять достаточно опытный аналитик. Стандартный вид таких событий (без фильтрации сигналов) на сейсмограммах станции PS23-Маканчи показан на рисунке 3. Красными флагками выделены вступления первой продольной и первой поперечной волн обсуждаемых событий. С помощью частотной фильтрации удается несколько улучшить четкость вступления S-волны, но выделение P-волны всегда остается проблематичным.

То, что все записи, подобные приведенным на рисунке 3, относятся к источникам из одного и того же района, подтверждалось близостью для всех событий времен запаздывания S и P-волн (значений времен  $T_{S-P}$ ), а также результатами определения азимутов на источник по данным f-k-анализа. Разница значений  $S_n - P_n$  находится примерно в диапазоне 55 – 60 сек, иногда близко к этому. Согласно годографам, эпицентры этих событий находятся на удалении от станции PS23-Маканчи около 500 км. Азимуты на источник определяются достаточно уверенно и довольно хорошо соответствуют друг другу по данным разных типов волн: диапазон азимутов примерно равен  $185^\circ - 190^\circ$ . Сомнений не было, что все эти события относятся к определенному району и генерируются систематически. В сети станций НЯЦ РК эти события регистрируются в основном одной сейсмической группой - PS23-Маканчи, данные других станций сети НЯЦ РК подключаются к ней изредка.

На рисунке 4 приведены примеры результатов проведенного f-k-анализа для волн  $P_n$  и  $S_n$  для локализации источники по данным одной сейсмической группы.

Все результаты обработки сигналов, которые выделялись на записях аналитиками Центра, включались в оперативный сейсмологический бюллетень. Однако природа этих событий до последнего времени оставалась неясной. Была проверена версия, не являются ли регистрируемые события следствием техногенной деятельности, например, карьерными взрывами? Для исследования были отобраны все события из района высокой активности в Центральном Тянь-Шане. В выборку вошли события за 2004 - 2008 г.г., всего около 2000 событий. На рисунке 5 приведено построенное по всем событиям распределение времени событий в очаге  $T_o$  в течение суток.

## ЛЕДНИКОВЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

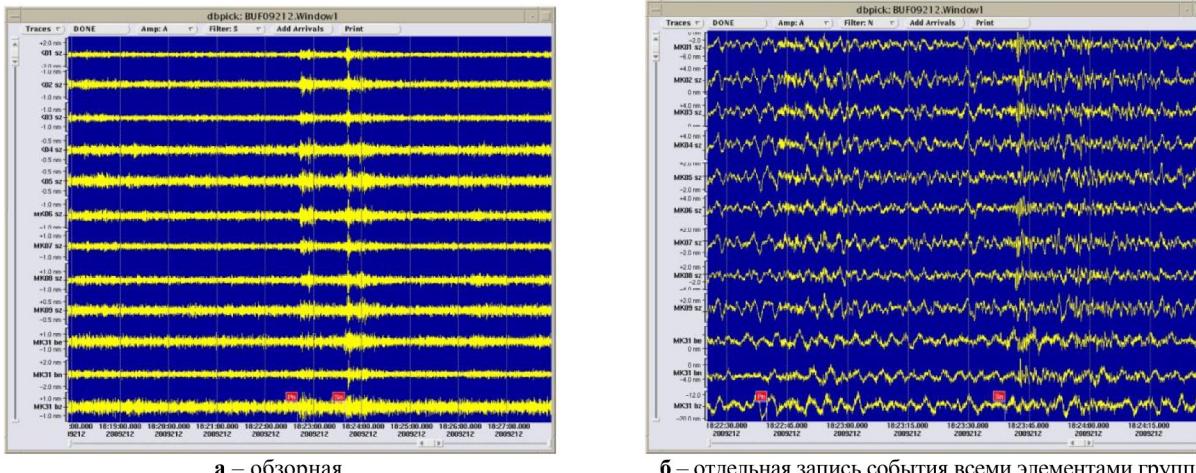


Рисунок 3. Вид записей исследуемых событий станцией PS23-Маканчи

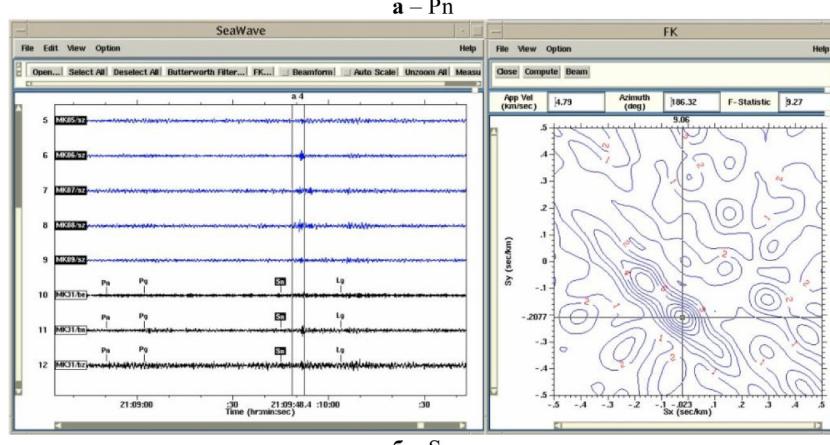
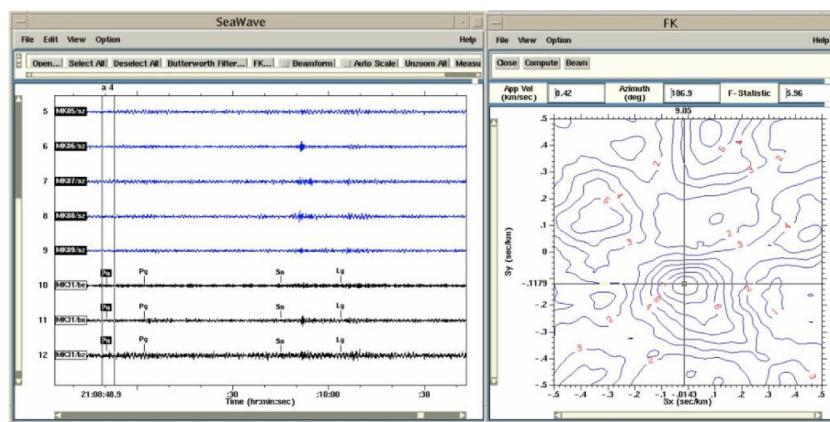


Рисунок 4. Результаты  $f\text{-}k$ -анализа записей одного из событий для волн

Из рисунка видно, что наблюдаемые события происходят практически в любое время суток. Однако четко отмечено, что их почти вдвое больше в ночное время – с 19 часов до 6 часов по местному времени (с 13 до 01 по UTC). Для карьерных взрывов картина, как правило, совершенно иная: в абсолютном большинстве случаев наибольшее количество взрывов регистрируется в рабочее дневное время суток с максимумом распределения, относящимся к определенным часам.

Если события являются естественными землетрясениями, их распределение по магнитудам или энергетическим классам должно удовлетворять закону повторяемости Гуттенберга – Рихтера [2]. По той же выборке построен график повторяемости по энергетическим классам Кр [3] (рисунок 5). Полученная зависимость показывает, что регистрируемые события с энергетическим классом более 6 в целом хорошо удовлетворяют закону повторяемости. События меньшей энергии, регистрируемые станцией не в

полном объеме, не являются представительными. Оценка тангенса угла наклона полученного графика  $\gamma = (-0,89)$ , показала, что его значение по абсолютной величине значительно превышает аналогичную величину, установленную многочисленными исследованиями для других районов Тянь-Шаня  $\gamma_{ср.} = (-0,45)$ . Для других различных сейсмогенерирующих зон Казахстана значения параметра варьируют от 0,40 до 0,49 [3]. Коэффициент  $\gamma$ , иногда называемый коэффициентом дробности среды, в случае тектонической деятельности в горных районах характеризует иерархичность землетрясений по энергиям, предопределенную иерархичностью блоковой структуры территорий.  $\gamma$  в силу естественных условий не может варьировать в широких пределах. Полученный результат означает, что в исследуемой вы-

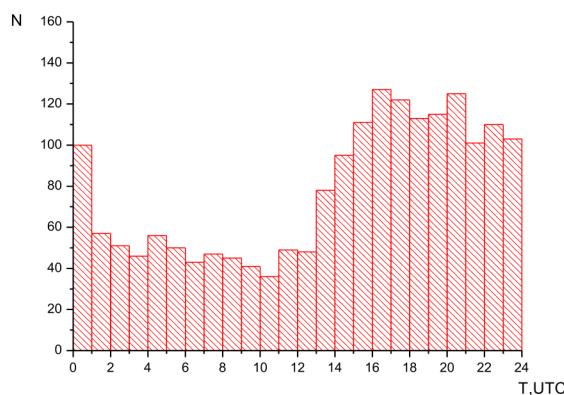


Рисунок 5. Распределение времени  $To$  для исследуемых событий

По результатам обработки, включенным в оперативный сейсмологический бюллетень Центра данных ИГИ НЯЦ РК, была построена карта эпицентров всех событий, зарегистрированных и локализованных в районе высотного Тянь-Шаня. На рисунке 7 а приведена карта эпицентров событий вне зависимости от их энергетического класса, зарегистрированных в основном станцией PS23-Маканчи. Следует отметить, что область максимальной концентрации событий, представляющих главный интерес, к востоку от максимально высокой его части, приурочена к районам постепенного уменьшения высот горных хребтов Тянь-Шаня. Именно здесь расположены хорошо известные грандиозные ледники Западного Китая. Особенno хорошо это видно на рисунке 7б, где совмещена карта эпицентров зарегистрированных событий с космическим снимком. Линейные размеры облака эпицентров составляют  $87 \times 93$  км.

Несмотря на то, что при локализации эпицентров, проведенной в основном по данным одной сейсмической группы, существует ошибка в определении координат эпицентров и вся область максимальной концентрации событий может быть сдвинута на единицы - десяток км к востоку, это не меняет общей картины.

борке доля слабых событий значительно больше, чем сильных. Сильных и даже средних по силе землетрясений с энергетическим классом  $>10$  за изучаемый период времени в данной зоне не зарегистрировано. Тем не менее, диапазон энергетических классов в целом шире, чем это характерно для большинства карьеров, где проводятся промышленные взрывы, имеющих обычно узкий ограниченный диапазон энергетических классов. Таким образом, версия о карьерных взрывах или другой техногенной деятельности не подтверждается. Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод, что наблюдавшиеся события, скорее всего, естественные землетрясения, хотя закономерности сейсмического режима отличаются от тектонических землетрясений и являются специфическими.

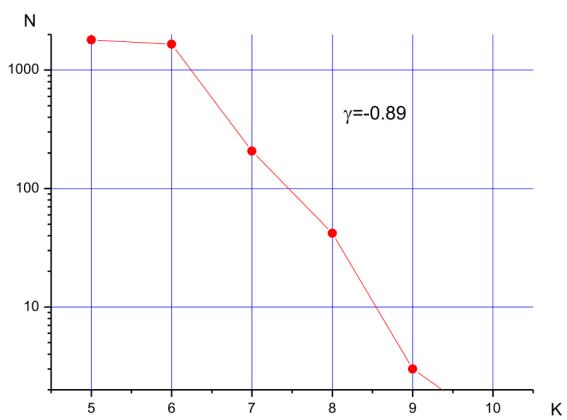
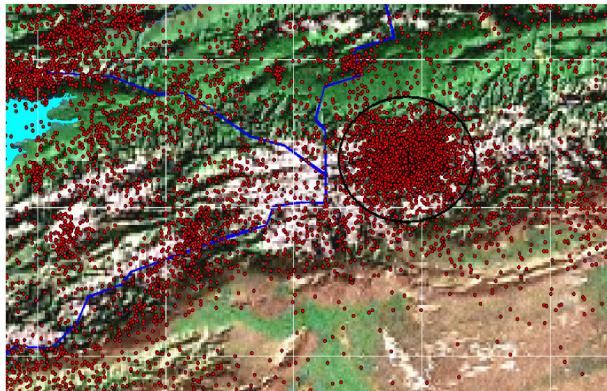


Рисунок 6. График повторяемости изучаемых событий по энергетическим классам

На основании приуроченности области максимальной концентрации эпицентров практически нулевой глубины к ледникам, возникло предположение, что исследуемые события являются землетрясениями, по своей природе связанными с ледниками и процессами, происходящими в них.

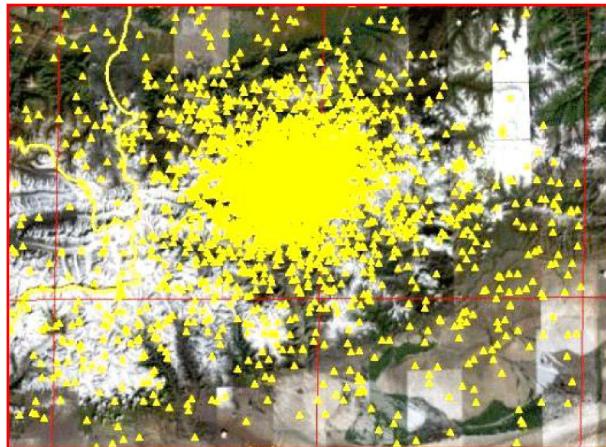
Общая площадь ледников изучаемого района составляет 7,3 тысячи квадратных километров. С хребтов Центрального Тянь-Шаня стекают сложные долинные ледники. Крупнейшие — Южный Иныльчек (длина 59,5 км), Северный Иныльчек (38,2 км). Зона оледенения продолжается и дальше на восток. На фотографиях (рисунок 8), сделанных альпинистами в этом районе [5], видны огромные просторы ледников.

Очевидцы отмечают масштабные ледопады разного рода, площадью несколько квадратных километров, башни-стволы разной высоты и между ними ветки, причудливо переплетенные друг с другом. Нигде в других местах, по их описаниям, они не видели настолько «навороченные» ледники на достаточно пологом склоне (здесь общий уклон не превышает 5 градусов).



**a – на геоморфологическую карту**

На рисунке 7а оконтурены эпицентры событий (около 2000), зарегистрированные станцией PS23-Маканчи



**б – на космический снимок**

*Рисунок 7. Эпицентры землетрясений за 2004 – 2008 гг.  
(по данным оперативного бюллетеня Центра данных ИГИ НЯЦ РК), вынесенные*



Общие характеристики ледопада: перепад высот - 700 м, протяженность - около 4-х км (видимая снизу часть - около 1 км)

*Рисунок 8. Фотографии ледников высотного Тянь-Шаня (вверху), ледопадов (внизу)*

Исходя из сделанного предположения о связи регистрируемых событий с ледниками процессами, были изучены временные вариации количества этих событий (рисунок 9).

Можно отметить, что наблюдается общий тренд в увеличении с годами количества таких землетрясений, в частности, за 2003 – 2006 гг. (в 2004 г. была некоторая потеря данных из-за перерыва в работе станции PS23-Маканчи, поэтому можно ожидать, что годовой максимум был фактически выше). В последующие годы аналитики неправлялись с огромным объ-

емом однотипной информации и обрабатывали записи событий, начиная с определенного уровня амплитуд. В настоящее время ежедневно в этой зоне регистрируется от 20 до 50 толчков. На рисунке 10 приведены годовые вариационные кривые количества событий, нормированные к годовому максимуму. Сочмешение графиков за 2004 – 2008 гг. четко выявляет сезонные ежегодные колебания количества толчков. Практически в каждый год наблюдений наименьшее число событий регистрируется в летние месяцы (апрель – август). С приближением зимы количество

толчков возрастает. Вполне логично предположить, что выявленные вариации связаны с изменением температуры. Именно понижение температуры приводит к образованию трещин в толще льда и увеличению количества регистрируемых землетрясений. Подобное явление четко просматривается на суточном распределении количества толчков: именно в ночное время их становится больше, а днем - меньше. На годовом графике зимой событий больше, чем летом.

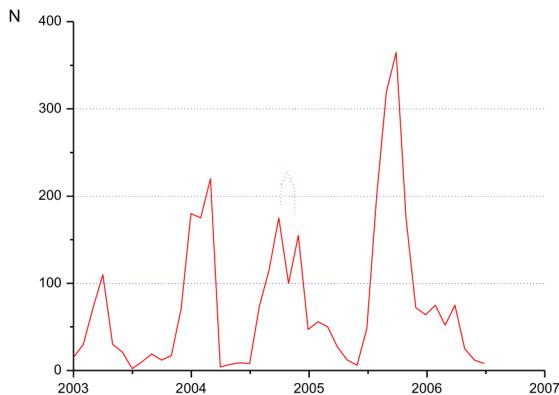


Рисунок 9. Временной ход месячного количества землетрясений

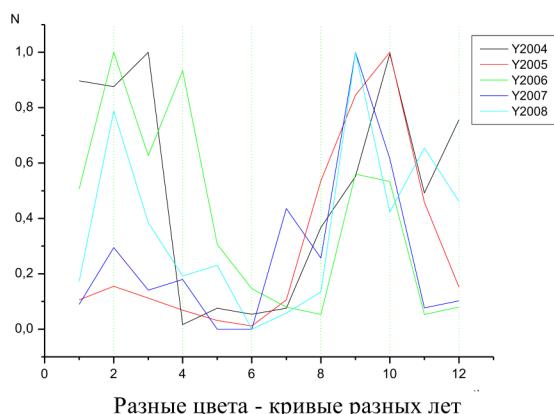


Рисунок 10. Графики изменений во времени месячных количеств землетрясений, нормированные к годовому максимуму

Можно обратиться к описанию явлений, связанных с процессами во льдах, в других природных условиях. Например, в [6] для озера Байкал приводится следующее описание. «...Сразу же после ледостава лед начинает интенсивно расти - по 4 - 5 см в сутки, и достигает толщины 150 - 200 см. Ледовый панцирь "дышит" всю зиму, сжимающие усилия во льду, возникающие при понижении температур, рвут лед на отдельные поля, при этом образуются термические швы, называемые становыми трещинами. Образование щелей и становых торосов сопровождается мощным раскатистым гулом, сравнимым по силе звука с раскатами грома или артиллерийской канонадой. Образуются торосы - нагромождение глыб льда высотой до 1.5 м, образующиеся при сжатии льдов вдоль становых трещин. Сильные дли-

тельные морозы заставляют лед расширяться, возникают трещины, ползущие предательски по отполированному ветром белым зеркалом. Но при особенно сильной стуже появляются становые щели, рассекающие лед на всю его глубину... В тихий морозный день слышится порой с Байкала гул и артиллерийский гром: это сходятся и расходятся становые щели, лопается лед, сминаются края, поднимаясь над сомкнувшейся щелью белым рыхлым валом. Для человека, не знающего особенностей зимней жизни славного моря, гул, протяжный треск, пушечные выстрелы покажутся настолько страшными, что он заторопится к берегу - там надежнее...».

Геофизики и раньше описывали некоторые сейсмические явления, связанные со льдом. Известны так называемые криосеймы (*cryoseism*) - дрожания почвы, вызванные растрескиванием смерзшегося грунта при таянии льда. Другое явление, получившее название *icequake* («льдотрясение»), связано с образованием трещин в толще льда. Считалось, что по сравнению с тектоническими землетрясениями, эти явления очень слабы и регистрируются только в непосредственной близости от эпицентра. Однако иногда в больших ледниковых щитах случаются намного более мощные процессы. Горан Экстрём (Göran Ekström) из Гарвардского университета (США) выявил класс необычных сейсмических событий, которые удалось связать с ледниками - *glacial Earthquakes*. Некоторые из таких ледниковых землетрясений могут быть весьма сильными. Например, сдвиг на 10 м слоя льда стометровой толщины площадью 50 км<sup>2</sup> вызывает сейсмический толчок магнитудой около 5 баллов. Впервые ледниковые землетрясения были описаны Экстрёмом в 2003 г. [7]. Землетрясения вызваны таянием ледника, при котором вода через трещины просачивается вниз, что вызывает движение ледника, скорость которого может достигать 10 м в минуту. Ледники сталкиваются друг с другом и вызывают сотрясения земли магнитудой до 5,1. С 1993г. группа Экстрёма изучила 136 таких толчков. Последние их данные показывают, что число ледниковых землетрясений резко увеличилось за последние годы. С 1993-го по 2002 г. ежегодно происходило не более 15 таких событий. Однако в 2003 г. их было 20, в 2004-м — 24, а за первые 10 месяцев 2005 г. отмечено 32 ледниковых землетрясения. Большая их часть происходит в Гренландии [8]. При сравнении с антарктическими ледниками делается вывод, что землетрясений в Гренландии больше потому, что там выше температура и поэтому ледники Гренландии наиболее подвержены таянию.

В случае ледников Центрального Тянь-Шаня, расположенного в центре континента, в зоне резко континентального климата, температурные изменения гораздо более существенны как в пределах суток, так и в течение года, чем в Гренландии и, тем более, в Антарктиде. Этим можно объяснить существенные вариации количества слабых событий, а также, возможно, и превалирование слабых земле-

трясений над средними и сильными, для образования которых, по-видимому, достаточно меньшего изменения температуры.

Возможно, наблюденные в данном исследовании все более активизирующиеся сейсмические ледниковые процессы в районе Центрального Тянь-Шаня связаны с отмечаемыми разными исследователями явлениями интенсивного таяния ледников. По разным данным общая площадь ледников в Синьцзяне сократилась на (7,4 – 20)% и линия снега отступила примерно на 60 м (195 футов) с 1964 г. Этот процесс сопровождается и уменьшением толщи льда, а также увеличением внутренней температуры ледников на 10% за последние двадцать лет.

Таким образом, проведенные исследования впервые позволили подойти к объяснению природы сейсмических сигналов, регистрируемых в большом количестве станциями Казахстана, представлявших долгое

время большой интерес и остававшихся загадкой. Представляется, что ледники Тянь-Шаня выступают постоянными генераторами слабых землетрясений. Если на расстоянии около 500 км регистрируются десятки таких событий ежедневно, то можно предположить, что еще более слабые события происходят в ледниках практически постоянно. Дальнейшие наблюдения за событиями позволяют более детально изучить закономерности проявления и динамику развития процессов в ледниках Центрального Тянь-Шаня.

Благодарности. Авторы выражают благодарность аналитикам Центра данных Бостановой Н.Ш., Денисеня М.И., Захаровой О., Куликовой Г.О. за скрупулезную каждодневную работу по обработке данных, результаты которой во многом способствовали написанию настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляшова, Н. Н. Система мониторинга ядерных испытаний НЯЦ РК: развитие и возможности / Н. Н Беляшова, Н. Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2007. - Вып. 2. – С. 5 - 82.
2. Гутенбог Б., Рихтер К. Сейсмичность Земли./ М., 1948.160с.
3. Rautian, T. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales / T. Rautian, V. Khalturin, K. Fujita, K. Mackey and A. Kendall // Seismological Research Letters, v. 78(6)
4. Сейсмическое районирование Республики Казахстан / Алматы: Изд-во Эверо, 2000. – 219 с.
5. [Электронный ресурс] / [http://www.mountain.ru/world\\_mountains/tien-shan](http://www.mountain.ru/world_mountains/tien-shan)
6. [Электронный ресурс] / <http://sbaikal.ru/rus/baikal/winter.html>
7. Ekström, G. Glacial EarthquakesGoran Ekström, Meredith Nettles, Geoffrey A. Abers// Science , 2003. - Vol. 302. no. 5645, P. 622 – 624.
8. Ekstrom, G. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes/ G. Ekstrom, M. Nettles and V. C. Tsai Science, 2006. - Vol. 311. - P. 1756 - 1758.

## ОРТАЛЫҚ ТЯНЬ-ШАНЬНІҢ МҰЗДЫҚ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІ

Михайлова Н.Н., Комаров И.И.

*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов қ., Қазақстан*

ҚР ҰЯО станцияларымен, бірінші кезеңінде PS23-Маканшы сейсмикалық топтастыруы, тіркелетін көп санды әлсіз жерсілкінудардың, Қыргызстан мен Қазақстан шекарасына жақын Қытай аумағында биіктік Тянь-Шаньнің зор аландарын алатын мұздықтармен байланысы алғашқы рет талқылануда. Мұздық жерсілкіндер санының тәуліктік және маусымдық вариациялары, соңғы жылдарда сондай жерсілкіндері көбеюі анықталған, бұл, әлемнің осы ауданында мұздықтардың аландары қарқынды қысқарылу процесстерімен жорамалданып байланыстырылады.

## GLACIAL EARTHQUAKES OF THE CENTRAL TIAN-SHAN

N.N. Mikhailova, I.I. Komarov

*Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

For the first time it is being discussed the relation of a great number of weak earthquakes, recorded by the NNC RK network, mainly by PS23-Makanchi Seismic Array, with glaciers covering vast areas of high Tian-Shan at China close to Kyrgyzstan and Kazakhstan borders. Daily and seasonal variations of the amount of glacial earthquakes, an increase of the earthquakes for the last years that presumably testifies the processes of intensive glacier area increase in this part of the world were established.