

УДК 550.34

Омуралиева А., Омуралиев М.  
Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан

## ДИНАМИКА СЕЙСМИЧНОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ТЯНЬ-ШАНЯ – АКТИВНОГО БЛОКА ПЕРВОГО ПОРЯДКА ЛИТОСФЕРЫ

**Аннотация.** Приведены результаты изучения иерархии сейсмических циклов в последовательности проявления землетрясений, высвобождения кумулятивной сейсмической энергии, повторяемости землетрясений и их интенсивности, пиковой скорости колебаний, пикового ускорения в Тянь-Шане и его окрестностях за 1863-2011 гг. Установлен универсальный параметр сейсмических процессов Тянь-Шаня - иерархия сейсмических циклов.

**Ключевые слова:** иерархия активных блоков литосферы, иерархия сейсмических циклов, универсальный параметр сейсмических процессов, высвобождение кумулятивной сейсмической энергии, повторяемость энергетического класса, интенсивность, пиковая скорость колебания, пиковое ускорение землетрясения.

## ЛИТОСФЕРАНЫН БИРИНЧИ ИРЕТТЕГИ БОЛГОН АКТИВДҮҮ БЛОГУ – ТЯНЬ-ШАНДАГЫ СЕЙСМИКАЛУУЛУК ДИНАМИКАСЫ ЖАНА СЕЙСМИКАЛЫК КОРКУНУЧ

**Кыскача мазмуну.** Макалада Тянь-Шандагы жана анын айланасындагы 1863-2011 жж. жер титирөөлөрдүн болушунун ырааттуулугунда сейсмикалык циклдердин иерархиясын, кумулятивдүү сейсмикалык энергиянын бошонуусун, жер титирөөлөрдүн жана алардын интенсивдүүлүгүнүн кайталанышын, термелүүнүн эң жогорку ылдамдыгын жана ылдамдануусун изилдөө жыйынтыктары келтирилген. Сейсмикалык циклдердин иерархиясы деген Тянь-Шандагы сейсмикалык процесстердин универсалдуу параметри аныкталган.

**Негизги сөздөр:** литосферанын активдүү блокторунун иерархиясы, сейсмикалык циклдердин иерархиясы, сейсмикалык процесстердин универсалдуу параметри, кумулятивдүү сейсмикалык энергиянын бошонуусу, энергиялык класстын кайталанышы, интенсивдүүлүк (күч), термелүүнүн эң жогорку ылдамдыгы, жер титирөөнүн эң жогорку ылдамдануусу.

## DYNAMICS OF SEISMICITY AND THE SEISMIC HAZARD OF THE TIEN-SHAN - THE FIRST-ORDER ACTIVE BLOCK OF THE LITHOSPHERE

**Abstract.** Investigation's results of the hierarchy of seismic cycles in the sequence of earthquake occurrences, cumulative seismic energy release, recurrence of earthquakes and their intensity, peak velocity of oscillations, peak acceleration in the Tien Shan and its vicinity for 1863-2011 are presented in the paper. A universal parameter of the seismic processes in the Tien Shan, hierarchy of seismic cycles is determined.

**Keywords:** hierarchy of active lithospheric blocks, hierarchy of seismic cycles, universal parameter of seismic processes, cumulative seismic energy release, recurrence of the energy class, intensity, peak velocity of oscillation, peak acceleration of an earthquake.

### Введение

Тянь-Шань в целом, ограниченный с юга областью горообразования Памир и Таримской плитой, а с севера Казахским щитом и Туранской плитой, является, согласно классификации принятой нами [1], блоком первого порядка (рисунок 1).

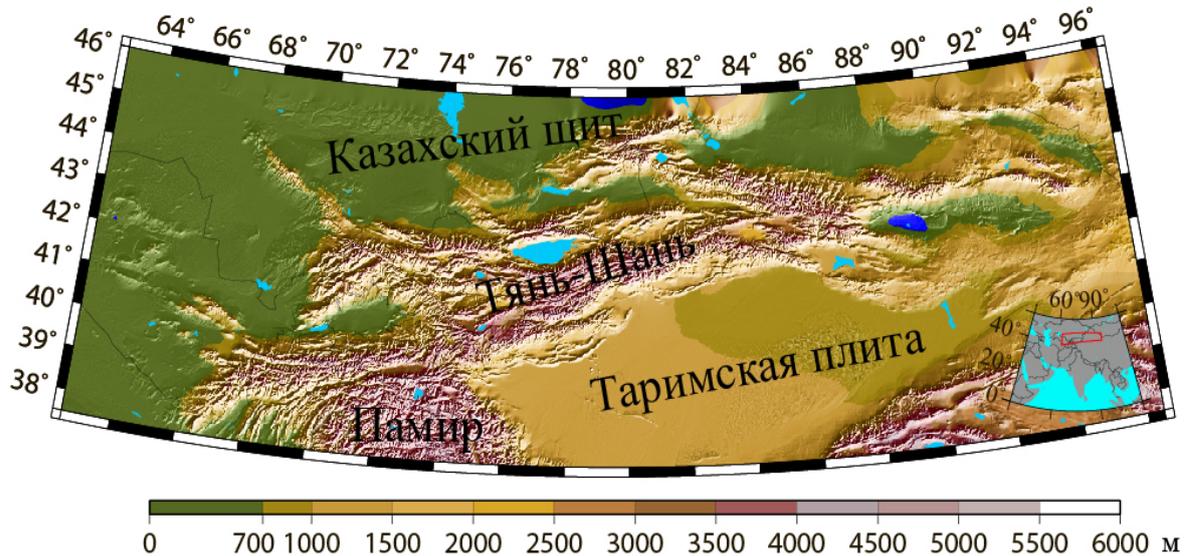


Рис.1. Положение Тянь-Шаня, блока первого порядка, между Таримской плитой, Памиром на юге и Казахским щитом, Туранской плитой на севере.

### Чередование периодов сейсмической активизации и затишья при последовательностях землетрясений

Динамика сейсмических процессов выражена в последовательности проявления землетрясений. Рассмотрим последовательность землетрясений ( $K \geq 12$ , общее количество 1692) в квадрате  $\varphi=38.5^{\circ}-45.0^{\circ}$ ,  $\lambda=63.0^{\circ}-96.0^{\circ}$  в Тянь-Шане и его окрестностях за 1863-2011 гг. (рисунки 2, 3). Наблюдается чередование периодов сейсмической активизации и затишья [2, 3]. Выделяются сейсмические циклы первого, второго, третьего и т.д. порядков. Так, пики активизации сейсмических циклов третьего порядка отмечались: 22 марта 1865 г. ( $K=15.5$ ), 11 июля 1889 г. ( $K=18.5$ ), 15 января 1896 г. ( $K=15.7$ ), 22 августа 1902 г. ( $K=17.6$ ), 3 января 1911 г. ( $K=17.8$ ), 12 июля 1924 г. ( $K=15.6$ ), 20 июня 1938 г. ( $K=16.6$ ), 2 ноября 1946 г. ( $K=17.0$ ), 15 апреля 1955 г. ( $K=16.4$ ), 13 апреля 1961 г. ( $K=16.1$ ), 17 мая 1976 г. ( $K=17.0$ ), 19 марта 1984 г. ( $K=17.0$ ), 19 августа 1992 г. ( $K=17.3$ ), 5 октября 2008 г. ( $K=16.0$ ). Время повторения циклов третьего порядка изменялось от 6 лет до 35 лет.

По пикам активизации третьего порядка отмечаются циклы второго порядка. При этом пики активизации циклов второго порядка проявлялись: 11 июля 1889 г. ( $K=18.5$ ), 3 января 1911 г. ( $K=17.8$ ), 1946-1949 гг. ( $K=17.0$ ), 1976-1992 гг. ( $K=17.0$ ). Время повторения циклов второго порядка составляло 23 года, 36 лет и 28 лет соответственно.

По пикам активизации второго порядка выделяется цикл первого порядка. При этом землетрясение 11 июля 1989 г. (Чиликское,  $K=18.9$ ) являлось пиком сейсмической активизации. После наблюдался спад сейсмической активизации и 3 января 1911 г. произошло землетрясение (Кеминское,  $K=17.8$ ). В дальнейшем наступило сейсмическое затишье цикла первого порядка и произошли 2 января 1946 г. (Чаткальское), 10 июня 1949 г. (Хайтское), 17 мая 1976 г. (Газли), 19 марта 1984 г. (Газли), 19 августа 1992 г. (Суусамырское) землетрясения с  $K=17.0$ .

Таким образом, иерархия сейсмических циклов представляет собой единственный универсальный параметр, который может точно выражать развитие сложной геодинамической системы и детально определять поведение сейсмических процессов.

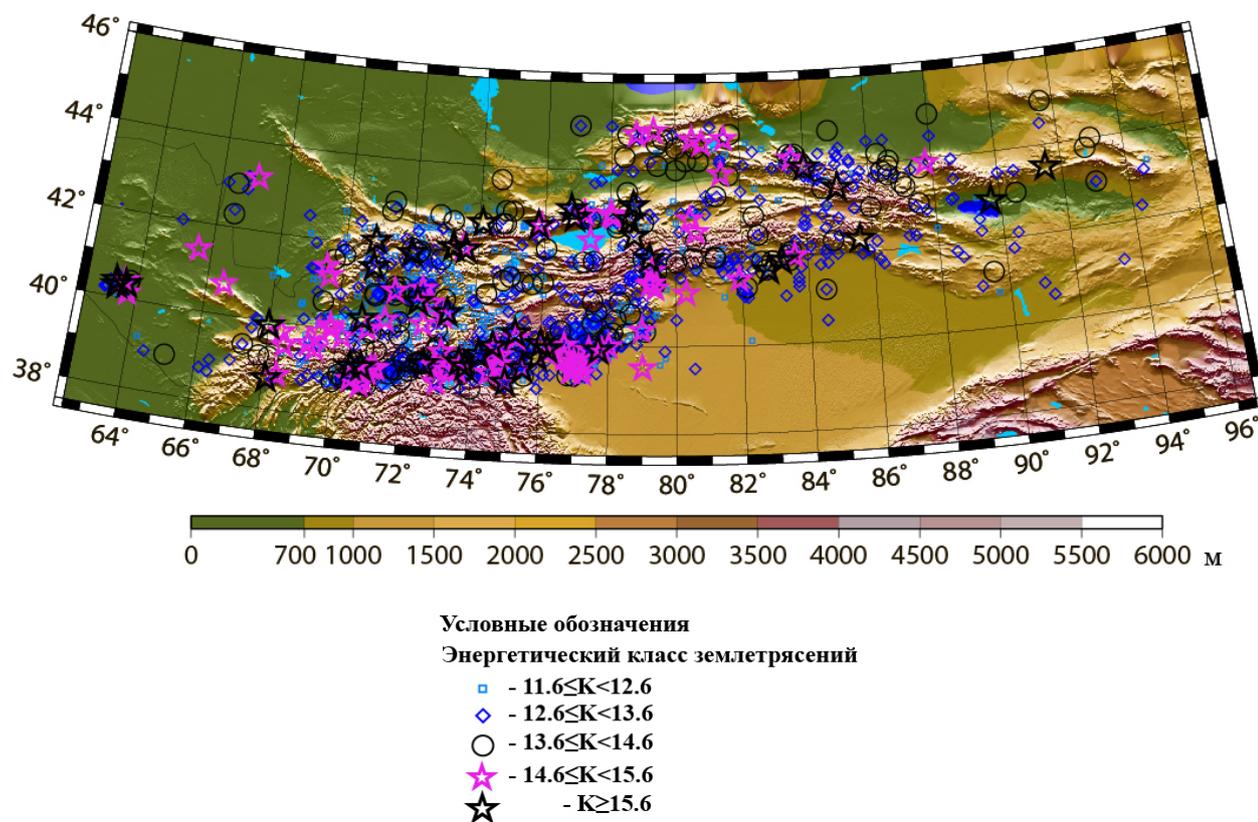


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений с  $K \geq 12$  области горообразования Тянь-Шань - блока первого порядка за 1863-2011 гг. по данным каталогов [4, 5, 6].

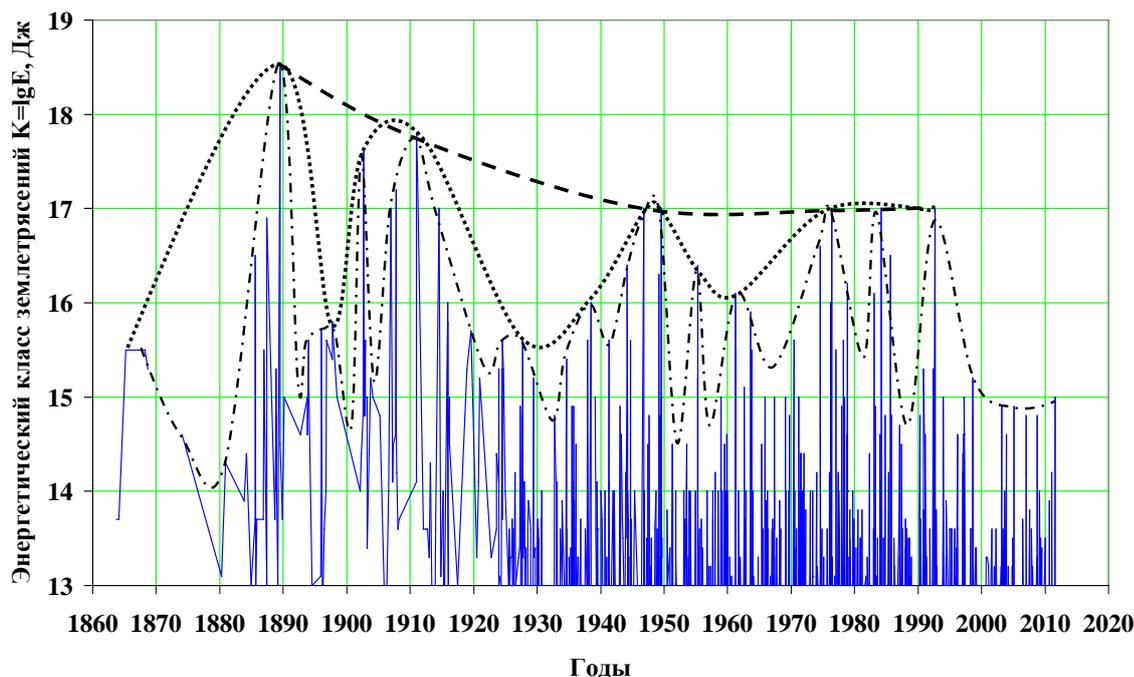


Рис. 3. Последовательность проявления землетрясений ( $K \geq 12$ ) в квадрате  $\varphi = 38.5^\circ - 45.0^\circ$ ,  $\lambda = 63.0^\circ - 96.0^\circ$  Тянь-Шаня – блока первого порядка за 1863- 2011 гг. Сейсмические

циклы первого, второго, третьего порядков обозначены пунктирной, точечной и пунктирной с точками линиями, соответственно.

### Высвобождение энергии при последовательностях землетрясений

Сейсмические циклы выражены в высвобождении энергии при последовательностях землетрясений. На рисунке 4 показана суммарная сейсмическая энергия [7, 8], высвобожденная при землетрясениях ( $K \geq 12$ ) Тянь-Шаня и его окрестностей в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  с 1863 г. по 2011 г.

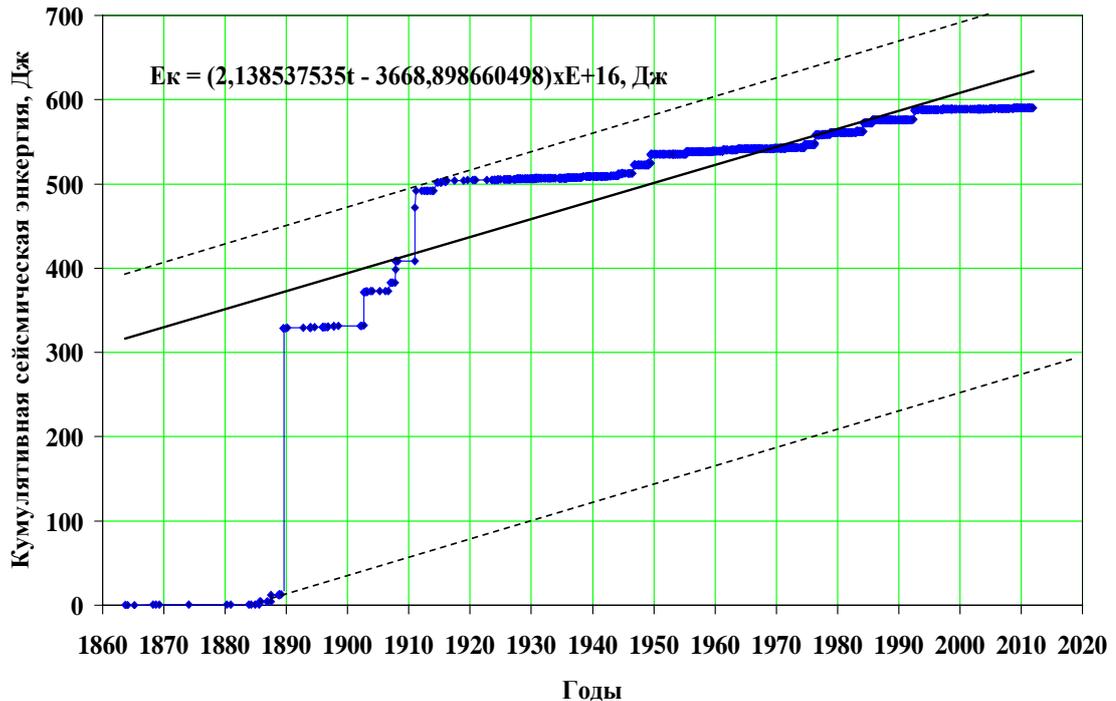


Рис. 4. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с энергетическими классами  $K \geq 12$  в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  с 1863 г. по 2011 г. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией, нижний и верхний пределы флуктуации энергии — пунктирными линиями.

Линейный тренд кумулятивной сейсмической энергии выражается эмпирической формулой:

$$E_k = (2.138537535t - 3668.898660498)xE + 16, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $E_k$  — кумулятивная сейсмическая энергия (Дж),  $t$  — время, коэффициент  $2,138537535E+16$  имеет размерность Дж/год, т.е. мощности сейсмической энергии. Разница значений энергии верхнего и нижнего пределов флуктуации составляет  $4.4E+18$  Дж и представляет собой максимальный энергетический класс  $K_{\max}=18.6$  землетрясения Тянь-Шаня. Из графика изменения кумулятивной сейсмической энергии видно, что максимальная сейсмическая энергия региона достигнута энергиями (двух и более) землетрясений в течение 1889-1911 гг., в том числе Чиликского и Кеминского, и после 1911 г. наступил период сейсмического затишья. Линия нижнего предела флуктуации выражается эмпирической формулой:

$$E_k = (2.138537535t - 4027,330239857)xE + 16, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где  $E_k$  — кумулятивная сейсмическая энергия (Дж),  $t$  — время. Интервал времени от конечной точки ( $t_k=2011.919$  год) графика кумулятивной сейсмической энергии

( $E_k=590,5083 \times 10^{16}$  Дж) до нижней линии ( $t_n=2159.344$  год) (по горизонтальной линии) по формуле (2) составляет  $(2159.344-2011.919) = 147.4$  год. Соответственно, через около 140 лет, вероятно, наступит период активизации сейсмического цикла первого порядка.

Из вышеизложенного следует, что процессы высвобождения сейсмической энергии землетрясений Тянь-Шаня выражают (как функции от времени) сейсмические циклы разного порядка.

### Повторяемость землетрясений области горообразования Тянь-Шань - блока первого порядка

Средняя годовая частота землетрясений в Тянь-Шане определена в соответствии с законом Гутенберга-Рихтера [9] (табл.1).

Таблица 1. Средняя годовая частота  $N$  землетрясений в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  за 1863-2011 гг.

Энергетический класс, $K$	18.5-17.6	17.5-16.6	16.5-15.6	15.5-14.6	14.5-13.6
Частота $N$	0.02	0.08	0.19	0.56	1.56
Энергия ( $10^{23}$ эрг), высвободившаяся в течение года	2.013	0.805	0.194	0.086	0.015
Часть полной энергии, высвободившаяся в течение года, %	65.17	26.06	6.30	1.80	0.50

Связь энергетического класса и средней годовой частоты землетрясений приведена на рисунке 5.

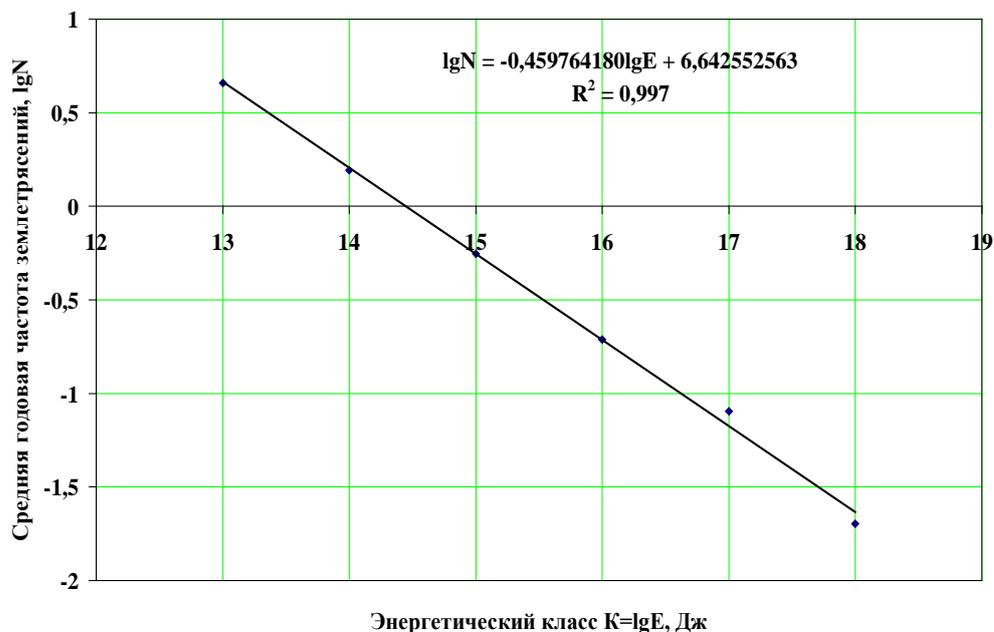


Рис.5. График повторяемости землетрясений ( $K=13-18$ ) Тянь-Шаня и его окрестностей в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  за 1863-2011 гг.

График повторяемости землетрясений выражается соотношением:

$$\lg N = -0.459764180 \lg E + 6.642552563, R^2 = 0.997, \quad (3)$$

где N-средняя годовая частота землетрясений, E – сейсмическая энергия (Дж),  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Из (3) следует, что проявление землетрясений происходит по степенному закону:

$$N = 10^{6.64} \times E^{-0.4597}, R^2 = 0.997. \quad (4)$$

Процесс образования землетрясений имеет фрактальную (дробную) размерность, равную 0.4597. Это означает, что геофизическая среда, сформированная из очагов землетрясений, отличается от газообразных и твёрдых тел.

На основании табл.1, формул (3) и (4) можно определить вероятное время повторения землетрясений (табл.2).

Таблица 2. Время повторения T (год) и средняя вероятность (P, %) проявления землетрясений в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  за 1863-2011 гг.

Энергетический класс K	18.5-17.6	17.5-16.6	16.5-15.6	15.5-14.6	14.5-13.6
Время повторения T	18	17	16	15	14
Средняя вероятность проявления при времени ожидания t	49	12	5	1.8	0.6
	80 при t=40 лет	88 при t=11 лет	87 при t=4.5 лет	83 при t=1.5 лет	78 при t=0.5 лет

Повторяемость землетрясений Тянь-Шаня - блока первого порядка, выраженная формулой (3) в соответствии с законом Гуттенберга – Рихтера, позволяет определить параметры сейсмической опасности: время повторения и вероятность ожидания землетрясений разного энергетического класса (табл.3).

Таблица 3. Время повторения и вероятность землетрясений Тянь-Шаня - блока первого порядка.

Параметры сейсмической опасности	Энергетический класс $K=\lg E$ , Дж				
	14	15	16	17	18
Время повторения T (лет)	0.6	1.8	5.1	12.4	49.6
Средняя вероятность P (%) землетрясения при времени ожидания t, год	78 при t = 0.5 лет	83 при t = 1.5 года	87 при t = 4 года	88 при t = 11 лет	80 при t = 40 лет

Известно [10, 11], что определённому значению максимальной интенсивности  $I_0$  (энергетического класса  $K=\lg E$ , магнитуды M) соответствует характерное значение пикового ускорения и пиковой скорости колебаний (табл.4).

Таблица 4. Максимальная интенсивность  $I_0$  (балл), пиковое ускорение ПУ (%g, м/сек<sup>2</sup>), пиковая скорость ПС (см/сек).

Максимальная интенсивность $I_0$ , балл	Пиковое ускорение, % g и см/сек <sup>2</sup>	Пиковая скорость, см/сек
I	<0,17 и < 1,6	<0,1
II - III	0,17 - 1,4 и 1,6 - 13,7	0,1 - 1,1

IV	1,4 – 3,9 и 13,7 - 38,2	1,1 – 3,4
V	3,9 – 9,2 и 38,2 - 90,2	3,4 – 8,1
VI	9,2 – 18 и 90,2 - 176,6	8,1 - 16
VII	18 – 34 и 176,6 - 333,5	16 – 31
VIII	34 – 65 и 333,5 – 667	31 – 60
IX	65 – 124 и 667 – 1216	60 – 116
X-XII	>124 и >1216	>116

В связи с этим возникла возможность и необходимость определения повторяемости максимальной интенсивности  $I_0$ , избранных значений пикового ускорения (ПУ) и пиковой скорости (ПС) землетрясений Тянь-Шаня в целом. На рисунке 6 приведён график повторяемости максимальной интенсивности землетрясений в плейстосейстовой зоне.

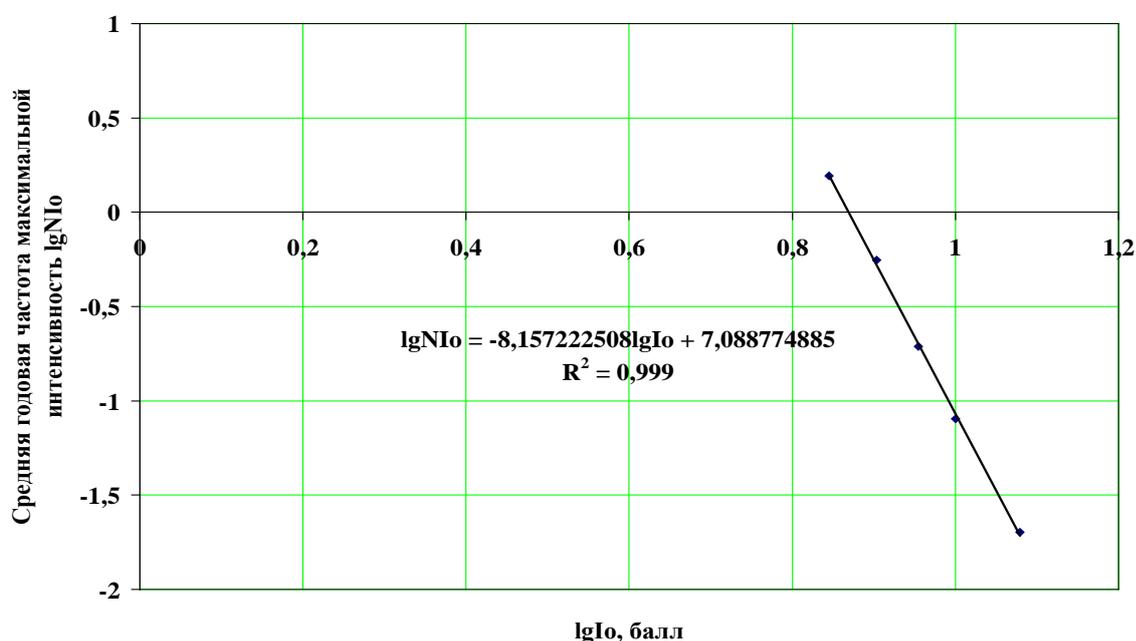


Рис.6. График повторяемости максимальной интенсивности  $I_0$  (балл) землетрясений ( $K=14-18$ ) в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  за 1863-2011 гг.

График повторяемости максимальной интенсивности землетрясений выражается соотношением:

$$\lg N_{I_0} = -8.157222508 \lg I_0 + 7.088774885, R^2 = 0.999, \quad (5)$$

где  $N_{I_0}$  – средняя годовая частота,  $I_0$  – максимальная интенсивность (балл),  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Из (5) следует, что проявление максимальной интенсивности имеет фрактальную (8,1572), т.е. дробную размерность и распределяется по степенному закону:

$$N_{I_0} = 10^{7.08877} \times I_0^{-8.1572}, R^2 = 0.999 \quad (6)$$

На рисунке 7 показан график повторяемости пикового ускорения землетрясений в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^\circ-45.0^\circ$ ,  $\lambda=63.0^\circ-96.0^\circ$  за 1863-2011 гг.

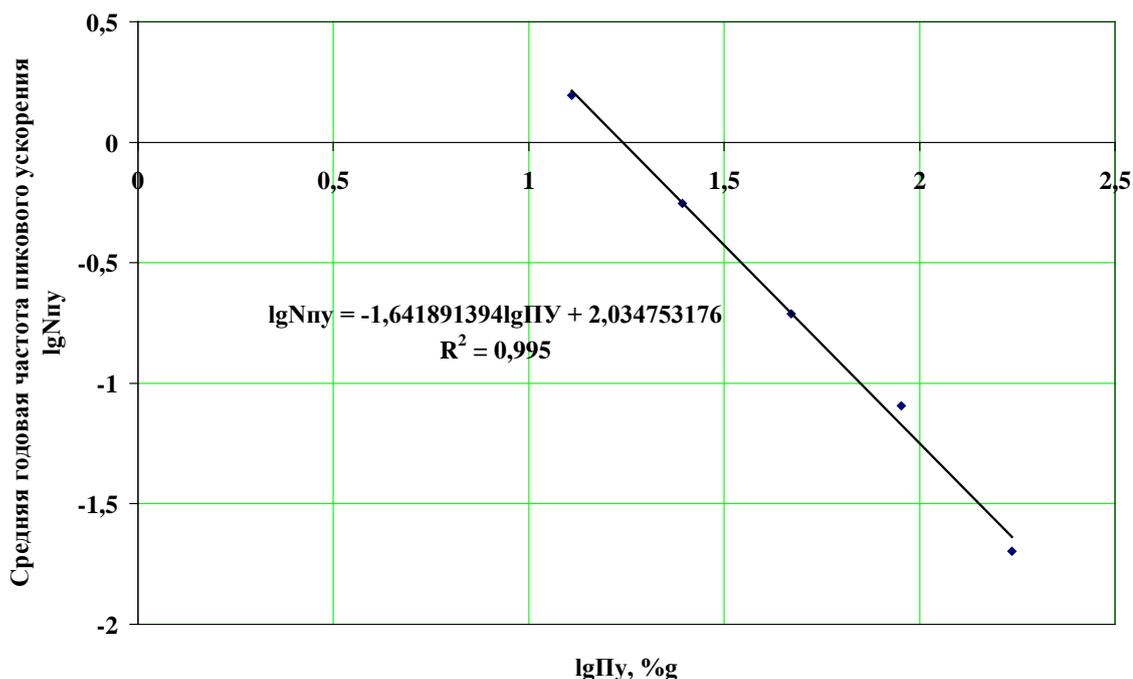


Рис.7. График повторяемости пикового ускорения землетрясений (К=14-18) в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^{\circ}-45.0^{\circ}$ ,  $\lambda=63.0^{\circ}-96.0^{\circ}$  за 1863-2011 гг.

График повторяемости пикового ускорения землетрясений выражается соотношением:

$$\lg N_{пу} = -1.641891394 \lg ПУ + 2.034753176, R^2 = 0.995, \quad (7)$$

где  $N_{пу}$  - средняя годовая частота, ПУ – пиковое ускорение (%g),  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Из (7) следует, что проявление пикового ускорения землетрясений имеет фрактальную (1,641891394), т.е. дробную размерность и распределяется по степенному закону:

$$N_{пу} = 10^{2.034753176} \times ПУ^{-1.641891394}, R^2 = 0.995. \quad (8)$$

На рисунке 8 показан график повторяемости пиковой скорости колебаний землетрясений (К=14-18) в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^{\circ}-45.0^{\circ}$ ,  $\lambda=63.0^{\circ}-96.0^{\circ}$  за 1863-2011 гг.

График повторяемости пиковой скорости землетрясений выражается соотношением:

$$\lg N_{пс} = -1.605532056 \lg ПС + 1.910774170, R^2 = 0.995, \quad (9)$$

где  $N_{пс}$  – средняя годовая частота, ПС – пиковая скорость (см/сек),  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Из (9) следует, что проявление пиковой скорости землетрясений имеет фрактальную (1,605532056), т.е. дробную размерность и распределяется по степенному закону:

$$N_{пс} = 10^{1.910774170} \times ПУ^{-1.605532056}, R^2 = 0.995. \quad (10)$$

Следовательно, сейсмостойкость зданий и сооружений предопределяется повторяемостью пиковых ускорений и пиковых скоростей в соответствии с формулами (7)-(10).

Избранные значения пикового ускорения, свойственные определённым значениям энергетического класса (магнитуды, максимальной интенсивности  $I_0$ , пиковой скорости), имеют характерное время повторения:

$$T_{пу} = 10^{-2.034753176} \times ПУ^{1.641891394}, R^2 = 0.995, \quad (11)$$

где  $T_{пу}$  – время повторения пикового ускорения (год), ПУ – пиковое ускорение (%g),  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Следует отметить, что затухание пикового ускорения происходит после первой изосейста (после плейстосейстовой зоны) с относительно максимальной интенсивностью [12]. Эти различные пиковые ускорения последовательно накапливаются в определённых микрорайонах сейсмического района и периодически воздействуют на грунты, стройки в соответствии с сейсмическими циклами разного порядка. Однако, комплексный анализ фактического макросейсмического поля и поля пиковых ускорений в плейстосейстовой зоне показал, что инженерно-геологические условия грунта на земной поверхности до землетрясения играют незначительную роль, во время главного толчка в среде происходит особый нелинейный сейсмический процесс.

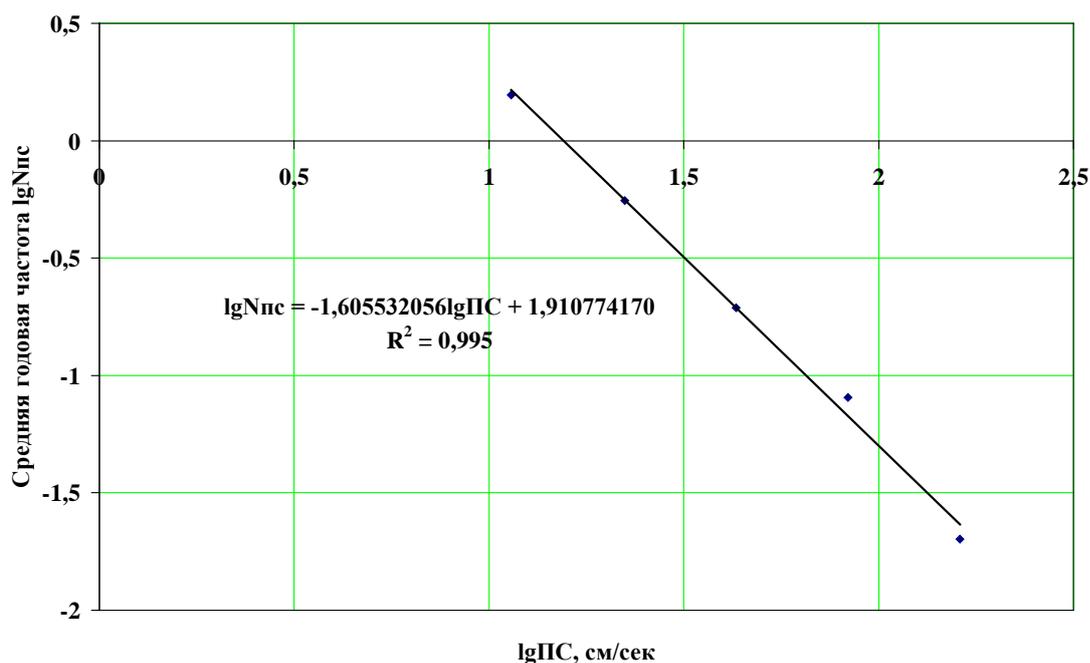


Рис.8. График повторяемости пиковой скорости землетрясений (К=14-18) в Тянь-Шане и его окрестностях в квадрате  $\varphi=38.5^{\circ}-45.0^{\circ}$ ,  $\lambda=63.0^{\circ}-96.0^{\circ}$  за 1863-2011 гг.

### Заключение

1. Установлен универсальный параметр динамики сейсмических процессов - иерархия сейсмических циклов Тянь-Шаня (активного блока первого порядка). Время повторения циклов третьего порядка изменялось от 6 лет до 35 лет, циклов второго порядка составляло 23 года, 36 лет и 28 лет. Цикл первого порядка (после 1889 г.) в настоящее время находится в периоде затишья.
2. Ступенчатый график изменения кумулятивной сейсмической энергии (как функции от времени), выражает иерархию сейсмических циклов. Осреднённая скорость высвобождения сейсмической энергии составляет 2.138 Дж/год.
3. Повторяемость землетрясений с различными сейсмическими энергиями (энергетическими классами) происходит по степенному закону:

$$N=10^{6.64} \times E^{-0.4597}, R^2=0,997,$$

где N- средняя годовая частота, E – сейсмическая энергия (Дж), степень 0.4597 – размерность (фрактальная) процесса проявления землетрясений,  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Осреднённое время повторения (T, год) землетрясений с определенными сейсмическими энергиями (E, Дж) выражается формулой:

$$T=10^{-6.64} \times E^{0.4597}, R^2=0.997.$$

4. Определены повторяемости максимальной интенсивности  $I_0$ , пиковой скорости колебаний грунта (ПС) и пикового ускорения (ПУ) в плейстосейстовой зоне. Повторяемость, например, пикового ускорения распределяется по степенному закону:

$$N_{пу} = 10^{2.034753176} \times ПУ^{-1.641891394}, R^2 = 0.995,$$

где  $N_{пу}$  – средняя годовая частота, ПУ – пиковое ускорение (%g),  $R^2$  – достоверность аппроксимации, степень 1.6418 – размерность (фрактальная) процесса повторения пиковых ускорений землетрясений. Осреднённое время повторения землетрясений с определёнными пиковыми ускорениями выражается формулой:

$$T_{пу} = 10^{-2.034753176} \times ПУ^{1.641891394}, R^2 = 0.995$$

где  $T_{пу}$  – время повторения пикового ускорения (год), ПУ – пиковое ускорение (%g),  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

### Литература

1. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. Bishkek: Pim, 2004, 166 p.
2. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии. // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. № 36(203). М: Наука, 1965. С. 66–93.
3. Омуралиев М., Омуралиева А. Средне- и краткосрочная сейсмическая опасность Тянь-Шаня и иерархия динамики сейсмических процессов (на территории Кыргызстана и приграничных районов соседних стран). - Бишкек: «ТриадаПринт», 2016. - 116 с.
4. Джанузакон К.Д., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 2003. – 216 с.
5. Проект МНТЦ #KR-1176 The Central Asia Seismic Risk Initiative <<http://www.istc.int/ru/project/8BA4EA8987923E8AC3256FE300375E83>>
6. Мамыров Э.М. Землетрясения Тянь-Шаня: магнитуда, сейсмический момент и энергетический класс. Бишкек: «Инсанат», 2012. – 234 с.
7. Tsuboi C. Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area, and strength of the earth's crust. // J. Phys. Earthq., 1956, v.4, pp.63-66.
8. Касахара К. Механика землетрясений (перев. с англ.) Москва: Мир, 1985, 264 с.
9. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. //BSSA, 1956, v. 46, pp. 105-145.
10. Grunthal, G., Musson, R., Schwarz, J., and Stucchi, M., 1998, European Macroseismic Scale (EMS-98): Luxembourg, Conseil de l'Europe, v. 15. <[http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98\\_Original\\_english.pdf](http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Original_english.pdf)>
11. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., and Kanamori, H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli Intensity in California: Earthquake Spectra, 1999, v. 15, no. 3, pp. 557–564.
12. Омуралиев М., Омуралиева А., Ачакеев Э. Атлас пиковых ускорений землетрясений и законы затухания пиковых ускорений сейсмогенных зон в пределах Кыргызстана и прилегающих районов стран Центральной Азии. Бишкек: «Полиграфресурсь». 2009, - 164 с.

Рецензент: д. г.-м. н., проф. Абдрахматов К.Е.