

Омуралиева А., Омуралиев М., Ачакеев Э.

**ДИНАМИКА СЕЙСМИЧНОСТИ И СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ ЗАПАДНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО БЛОКОВ ТЯНЬ-ШАНЯ**

*A. Omuralieva, M. Omuraliev, E. Achakeev*

**DYNAMICS OF SEISMICITY AND SEISMOGENIC RUPTURES OF THE WESTERN AND CENTRAL TIEN SHAN**

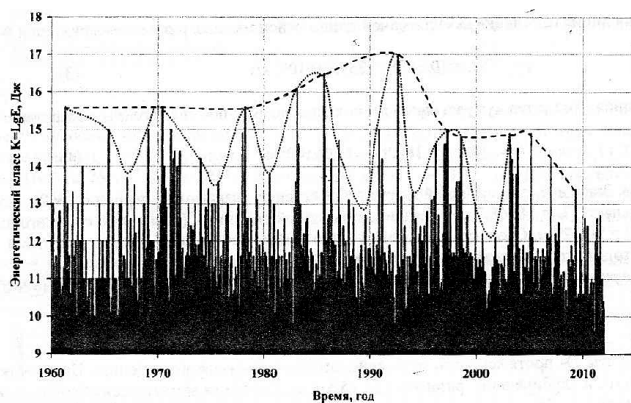
УДК:550.34

*В работе приводятся результаты изучения последовательности землетрясений Западного и Центрального блоков Тянь-Шаня. Основные параметры динамики сейсмичности и сейсмогенных разрывов в этих блоках, такие как периоды сейсмической активизации и затишья; изменение кумулятивной сейсмической энергии, длины сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений и подвижек; повторяемость землетрясений, отличаются. Время повторения землетрясений в этих блоках зависит от их площади.*

*The results of a study on earthquake sequence in the western and central tectonic blocks of the Tien Shan are presented in this paper. The main parameters of the dynamics of seismicity and seismogenic ruptures in these blocks are different. They are seismically active and calm periods, change of the cumulative seismic energy, change in length of seismogenic ruptures in the earthquake foci and values of shift at these faults, earthquake recurrence. Earthquake recurrence time in these blocks depends on their size.*

Западный и Центральный блоки Тянь-Шаня разделены зоной Таласо-Ферганского разлома северо-западного простирания. Западный блок с юга ограничен областью горообразования Памира, которая надвигается в северном направлении. На севере этот блок ограничен Туранской плитой, приграничные районы которой поэтапно вовлекаются в процесс горообразования. Центральная часть Ферганской впадины испытывает устойчивое прогибание. Центральный блок ограничен с юга плитой Тарима, а с севера Казахстанским щитом, которые поддвигаются под Тянь-Шань навстречу друг к другу [3, 4]. В пределах данного блока произошли катастрофические землетрясения с магнитудами  $M > 8$ : Чиликское (1889), Кашгарское (1902) и Кеминское (1911). В то время как в Западном блоке такие события еще не отмечены.

Динамика сейсмичности и сейсмогенных разрывов выражена в последовательности землетрясений, проявлении периодов сейсмической активизации и затишья, характере изменения кумулятивной сейсмической энергии, величинах сейсмической мощности и потока сейсмической энергии, повторяемости землетрясений, характере изменения кумулятивной длины сейсмогенных разрывов и величины подвижек по этим разрывам, скорости накопления длины разрывов и величины подвижек. Для изучения этих параметров использован каталог землетрясений Института сейсмологии НАН КР за период 1960-2011 гг.



**Западный блок Тянь-Шаня и примыкающие районы с 1961 г. по 1992 г. находились в периоде сейсмической активизации, который сопровождался в 1974 г. сильным Маркансуйским землетрясением ( $K=16,6$ ) (рис.1).**

1960 1970 1980 1990 2000 2010  
Время, год

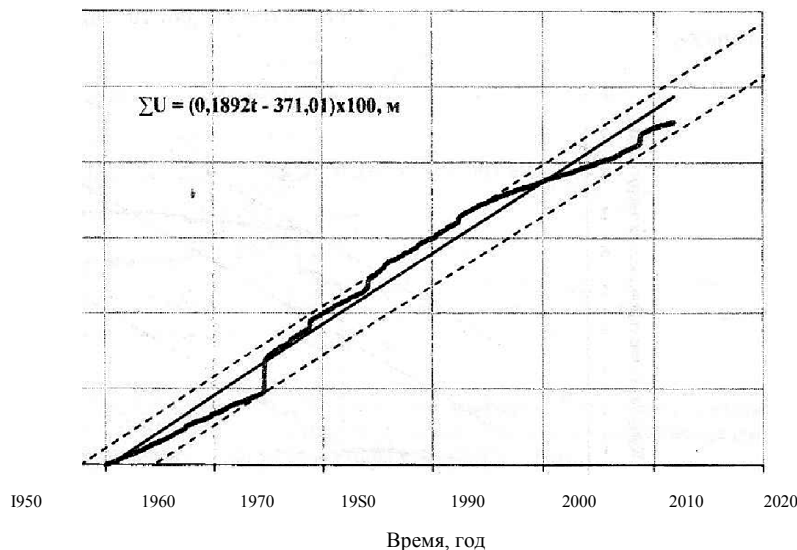
**Рис.1.** Последовательность проявления землетрясений с энергетическими классами  $K > 10$  за 1960-2011 гг. в Западном блоке Тянь-Шаня. Пунктирными линиями обозначены периоды активизации и затишья, точечными линиями - локальные периоды активизации и затишья.

С 1993 г. наступил период сейсмического затишья, который в 2006 г. сменился снова периодом сейсмической активизации и в 2008 г. сопровождался землетрясением Нура (K=14,8).

На графике изменения кумулятивной сейсмической энергии (рис.2) наблюдается тренд - осредненная линия, которая выражается формулой:

$$\Sigma E = (0,1527t - 297,66)T0^{16}, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где t - время.



**Рис. 2.** Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с энергетическими классами K>8 в Западном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначена средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации

Верхний и нижний пределы флуктуации кумулятивной энергии очерчиваются парой параллельных прямых. Верхняя линия выражается формулой:

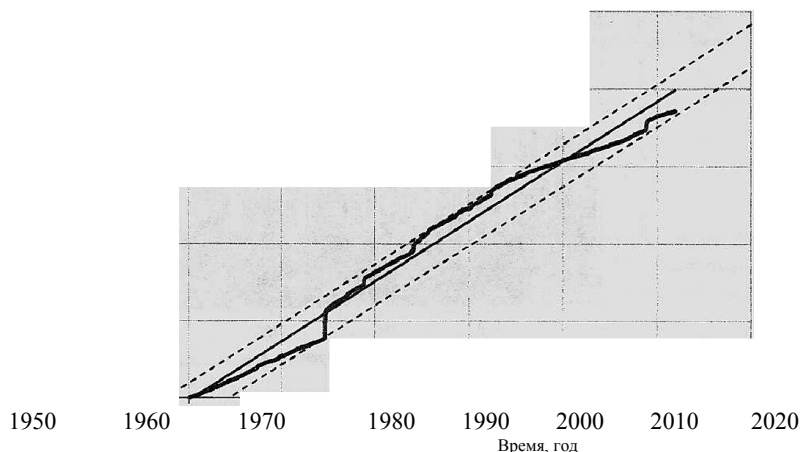
$$\Sigma E = (0,1527t - 295,49) \cdot 10^{16}, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где t - время.

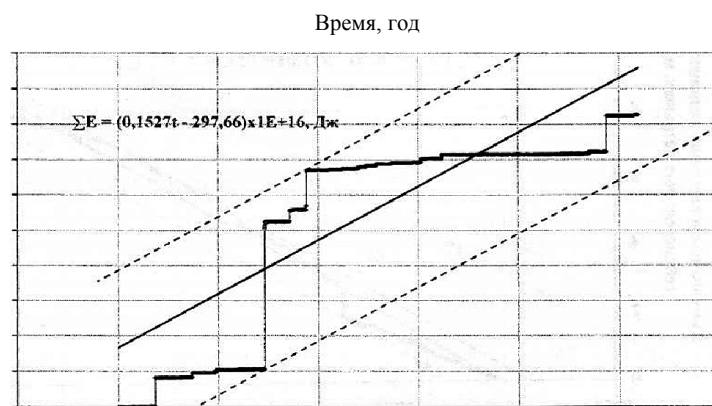
Максимальная энергия в данном блоке за рассматриваемый период времени - разница значений энергии между верхней и нижней линиями, составляла  $5,7 \cdot 10^{16}$  Дж. Суммарная энергия, которая может высвободиться при землетрясениях с 2012 г. - разница значений энергии между верхней линией ( $11,74 \cdot 10^{16}$  Дж) и кумулятивной энергией ( $8,26 \cdot 10^{16}$  Дж в 2011 г.), может достигнуть до  $3,48T0^{16}$  Дж. Значение суммарной энергии за период с 1960 г. по 2011 г. составлял около  $8,2 \cdot 10^{16}$  Дж. Мощность сейсмической энергии за 52-летний период принимает значение  $1,6 \cdot 10^{15}$  Дж/год, а поток сейсмической энергии - значение  $9,5 \cdot 10^9$  Дж/год-км.

На рисунках 3-4 приведены графики изменения кумулятивной длины сейсмогенных разрывов (ΣL) и кумулятивной величины подвижек (сдвигов) по сейсмогенным разрывам (ΣU) в рассматриваемом блоке.

$$\Sigma L = (0,3875t - 759,74) \times 10^0, \text{ км}$$



**Рис. 3.** Кумулятивная длина (ΣL) сейсмогенных разрывов, образованных при землетрясениях с энергетическими классами K>8 в Западном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначена средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации



**Рис. 4.** Кумулятивная величина (IU) вероятных подвижек по сейсмогенным разрывам, проявленных при последовательности землетрясений с  $K > 8$  в Западном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначен тренд - средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации

Средняя линия изменения кумулятивной длины сейсмогенных разрывов выражается формулой:

$$\Sigma L = (0,3875t - 759,74) - 100, \text{ км}, \quad (3)$$

а средняя линия изменения кумулятивной величины подвижек по сейсмогенным разрывам - формулой:

$$\Sigma U = (0,1892t - 371,0) - 100, \text{ м}, \quad (4)$$

где  $t$  - время. Значение кумулятивной длины сейсмогенных разрывов за период с 1960 г. по 2011 г в данном блоке составляет  $\Sigma L = 18568,7$  км. Значение суммарной подвижки (сдвига) по сейсмогенным разрывам составляет  $\Sigma U = 906,79$  м. Скорость накопления длины сейсмогенных разрывов за 52-летний период составляет 357,0 км/год, а скорость накопления сдвигов составляет 1743,8 см/год.

На основании данных  $\Sigma L$  и можно определить общий сейсмический момент ( $\Sigma M_0$ ) [2]:

$$\Sigma M_0 = \mu D \Sigma U \Sigma L, \quad (5)$$

где  $\mu$  - жесткость,  $D$  - протяженность зоны сейсмогенных разрывов по падению. При жесткости равной  $\mu = 3,7 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> и глубине зоны разрывов  $D = 25$  км (по глубинам землетрясений) общий сейсмический момент составляет:

$$\Sigma M_0 = 1,55 \cdot 10^{32} \text{ дин} \cdot \text{см}. \quad (6)$$

На основании формулы [1]:

$$\Sigma = (8/3\pi) \mu U/D \quad (7)$$

где  $\mu = 3,7 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> оценим суммарную величину сброшенного напряжения ( $I_a$ ) при  $\Sigma = 906,79$  м:

$$\sigma = (8/3\pi) \mu U/D = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2 \text{ (} 1,1 \cdot 10^4 \text{ Па)}. \quad (8)$$

Энергетический класс и среднегодовая частота землетрясений связываются соотношением (рис.5), подобно закону повторяемости Гутенберга - Рихтера:

$$\lg N = -0,5032K + 6,8359, R^2 = 0,999, \quad (9)$$

Центральный блок в 1961-2005 гг. находился в периоде сейсмической активизации (рис.6).

где  $N$  - среднегодовая частота,  $K = \lg E$  (Дж) - энергетический класс,  $R^2$  - достоверность аппроксимации. Связь энергетического класса и вероятного времени повторения землетрясений выражается формулой:

$$\lg T = 0,5032K - 6,8359, R^2 = 0,999. \quad (10)$$

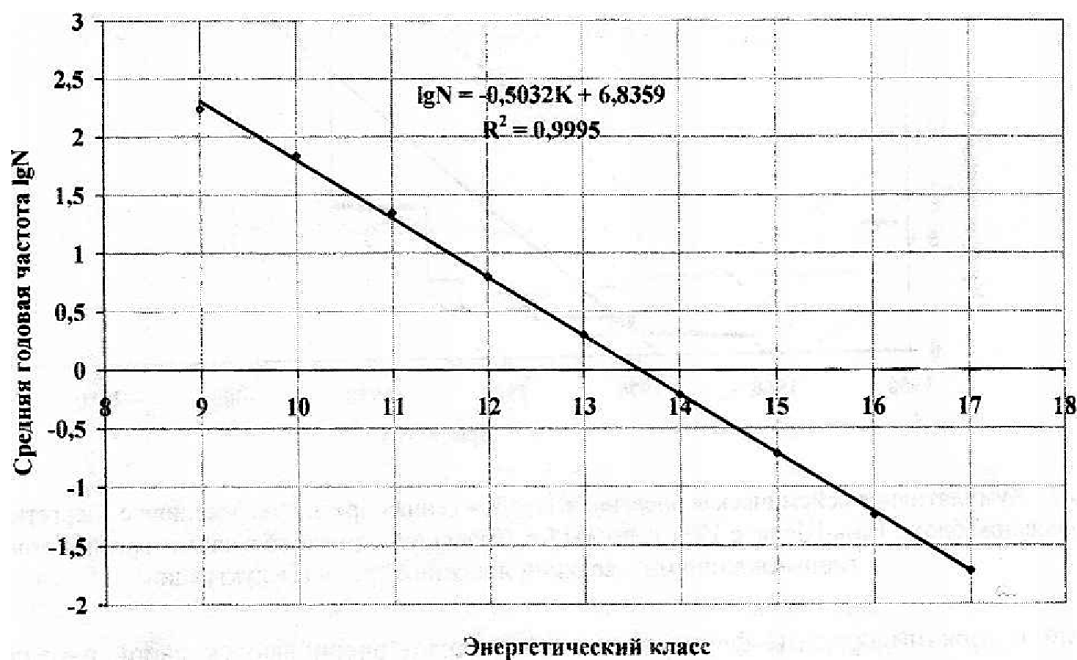


Рис.5. График повторяемости землетрясений с  $K>9$  в Западном блоке Тянь-Шаня за 1960-2011 гг.

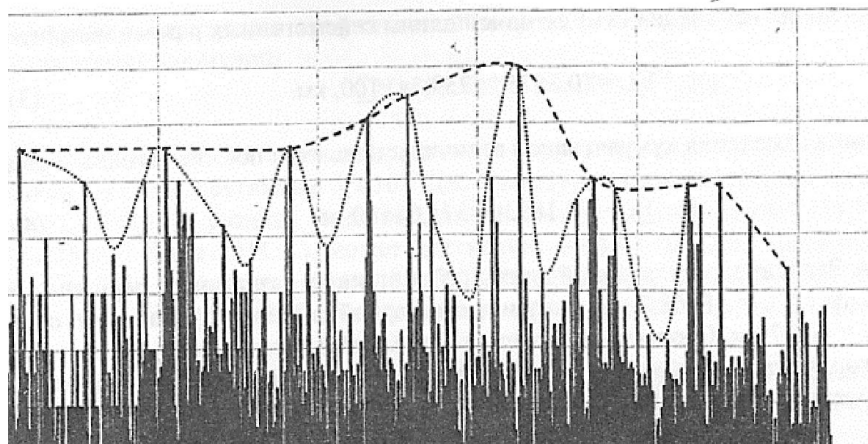


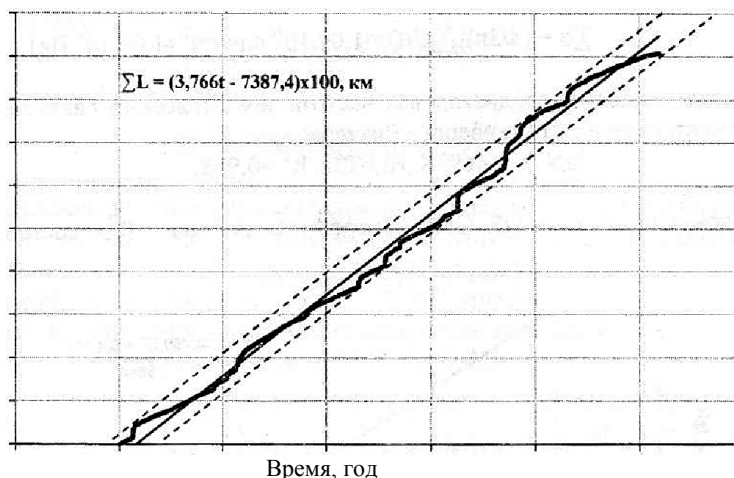
Рис.6. Последовательность проявления землетрясений с энергетическими классами  $K>10$  за 1960-2011 гг. в Центральном блоке Тянь-Шаня. Пунктирными линиями обозначены периоды сейсмической активизации и затишья, точечными линиями - локальные периоды активизации и затишья

При этом наблюдались локальные периоды сейсмической активизации (1961-1965гг., 1969-1971 гг., 1978 г., 1983-1985 гг., 1990-1992 гг., 1996-1998 гг., 2003-2005 гг.), разделенные локальными периодами сейсмического затишья. В пике периода сейсмической активизации в 1992 г. проявилось сильное ( $K=17$ ) Суусамырское землетрясение. С 2007 г. наступил период сейсмического затишья.

На графике изменения кумулятивной сейсмической энергии землетрясений с  $K>9$  (рис.7) выделяется тренд - средняя линия, которая выражается формулой:

$$\Sigma E = (0,5369t - 1056,8) \cdot 10^{16}, \text{ Дж}, \quad (11)$$

где t - время.



**Рис. 7.** Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с энергетическими классами  $K > 8$  в Центральном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначена средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации

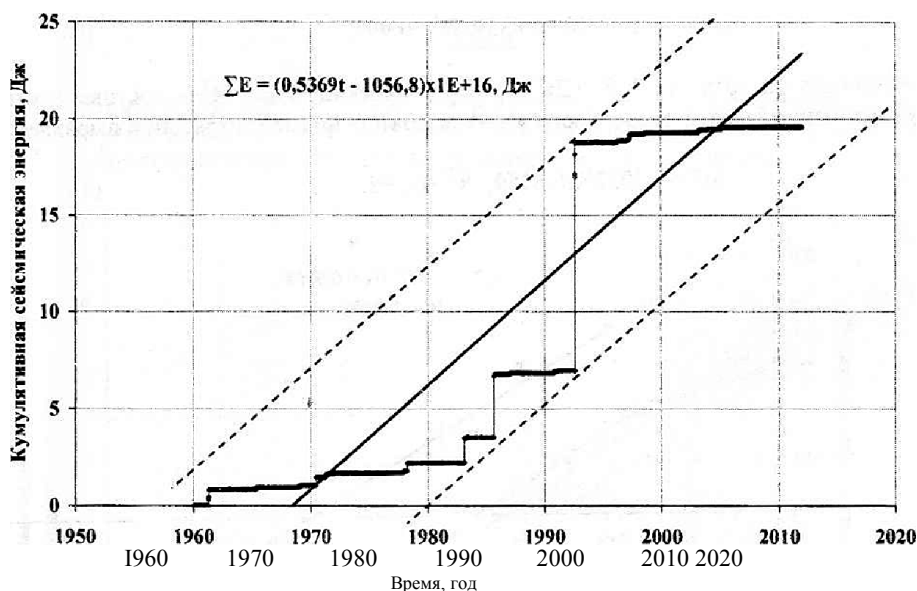
Верхний и нижний пределы флуктуации этой энергии очерчиваются парой параллельных прямых. Верхняя линия выражается формулой:

$$\Sigma E = (0,5369t - 1051,2) \cdot 10^{16}, \text{ Дж}, \quad (12)$$

где t - время.

Максимальная энергия в данном блоке в рассматриваемом периоде времени - разница значений энергии между верхней и нижней линиями, составляла  $11,8 \cdot 10^{16}$  Дж. Суммарная энергия, которая может высвободиться при землетрясениях с 2012 г. - разница значений энергии между верхней линией ( $29 \cdot 10^{16}$  Дж) и кумулятивной энергией ( $19,6 \cdot 10^{16}$  Дж в 2011 г.), может достигнуть до  $9,4 \cdot 10^{16}$  Дж. Значение суммарной энергии за период с 1960 г. по 2011 г. составляет около  $19,6 \cdot 10^{16}$  Дж. Мощность сейсмической энергии за 52-летний период составляет около  $3,8 \cdot 10^{15}$  Дж/год, а поток сейсмической энергии - около  $9,4 \cdot 10^9$  Дж/год-км<sup>2</sup>.

На рисунках 8-9 приведены графики изменения кумулятивной длины сейсмогенных разрывов ( $\Sigma L$ ) и кумулятивной величины подвижек (сдвигов) по сейсмогенным разрывам ( $\Sigma U$ ) при землетрясениях с  $K > 9$  в рассматриваемом блоке.



**Рис.8.** Кумулятивная длина ( $\Sigma L$ ) сейсмогенных разрывов, образованных при землетрясениях с энергетическими классами  $K > 8$  в Центральном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначена средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации

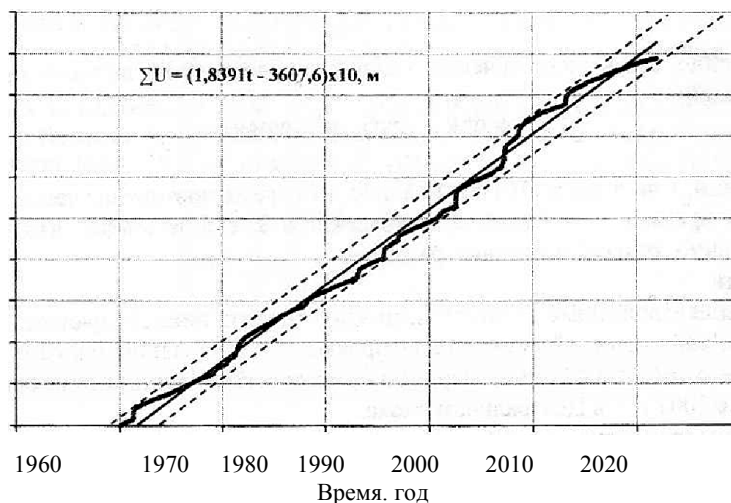
Средняя линия изменения кумулятивной длины сейсмогенных разрывов выражается формулой:

$$\Sigma L = (3,766t - 7387,4) \cdot 100, \text{ км}, \quad (13)$$

а средняя линия изменения кумулятивной величины подвижек по сейсмогенным разрывам - формулой:

$$\Sigma U = (1,8391t - 3607,6) \cdot 10, \text{ м}, \quad (14)$$

где  $t$  - время.



**Рис.9.** Кумулятивная величина ( $\Sigma U$ ) вероятных подвижек по сейсмогенным разрывам, проявленных при последовательности землетрясений с  $K > 8$  в Центральном блоке Тянь-Шаня с 1960 г. по 2011 г. Сплошной линией обозначена средняя линия графика, пунктирными линиями - верхний и нижний пределы флуктуации

Значение кумулятивной длины сейсмогенных разрывов за период с 1960 г. по 2011 г. в данном блоке составят  $\Sigma = 18181,2$  км. Значение суммарного сдвига по сейсмогенным разрывам составляет  $\Sigma U = 887,8$  м. Скорость накопления длины сейсмогенных разрывов за 52-летний период составляет 349,6 км/год, а скорость накопления сдвигов составляет 1707 см/год.

На основании (5) и данных  $\Sigma L$ ,  $\Sigma U$  можно определить общий сейсмический момент ( $\Sigma M_0$ ) [2]. При жесткости равной  $\mu = 3,7 \times 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> и глубине зоны разрывов  $D = 25$  км (по глубинам землетрясений) общий сейсмический момент составляет:

$$\Sigma M_0 = 1,48 \times 10^{32} \text{ дин} \cdot \text{см}. \quad (15)$$

На основании формулы (7) можно оценить суммарную величину сброшенного напряжения ( $\Sigma \sigma$ ) при  $\Sigma U = 887,8$  м:

$$\Sigma \sigma = (8/3\pi)\mu \Sigma U/D = 1,09 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2 \text{ (} 1,09 \cdot 10^4 \text{ Па)} \quad (16)$$

Энергетический класс и среднегодовая частота землетрясений связываются соотношением (рис.10), подобно закону повторяемости Гутенберга - Рихтера:

$$\lg N = -0,4693K + 6,4702, \quad R^2 = 0,988, \quad (17)$$

где  $N$  - среднегодовая частота,  $K = \lg E$  (Дж) - энергетический класс,  $R^2$  - достоверность аппроксимации.

Энергетический класс и среднегодовая частота землетрясений связываются соотношением (рис.10), подобно закону повторяемости Гутенберга - Рихтера:

$$\lg N = -0,4693K + 6,4702, \quad R = 0,988,$$

где  $N$  - среднегодовая частота,  $K = \lg E$  (Дж) - энергетический класс,  $R^2$  - достоверность аппроксимации.

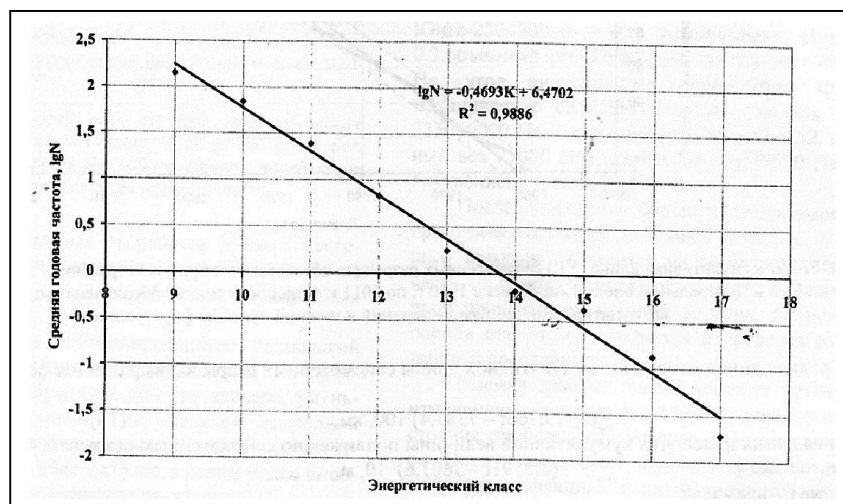


Рис.10. График повторяемости землетрясений с  $K > 9$  в Центральном блоке Тянь-Шаня за 1960-2011 гг.

Соответственно, связь энергетического класса и вероятного времени повторения землетрясений выражается формулой:

$$\lg T = 0,4693K - 6,4702, R^2 = 0,988. \quad (18)$$

Из выражений, в частности (10) и (18) видно, что время повторения землетрясений в Центральном блоке отличается от времени повторения землетрясений в Западном блоке, что указывает на разные условия динамики сейсмичности и сейсмогенных разрывов.

**Заключение**

Обобщая вышеизложенные результаты, можно отметить нижеследующее:

1. Периоды сейсмической активизации проявились в Западном блоке с 1961 г. по 1992 г., а в Центральном блоке - с 1961 г. по 2006 г. Периоды сейсмического затишья отмечались с 1993 г. по 2005 г. в Западном блоке, и с 2007 г. - в Центральном блоке.

2. Изменение кумулятивной сейсмической энергии имеет тренд в Западном блоке:

$$\Sigma E = (0,1527t - 297,66) \cdot 10^{10} \text{ Дж},$$

а в Центральном блоке:

$$\Sigma E = (0,5369t - 1056,80) \cdot 10^{16} \text{ Дж}.$$

Сейсмическая мощность составляла  $1,6 \cdot 10^{15}$  Дж/год и  $3,8 \cdot 10^{15}$  Дж/год в Западном и Центральном блоках, соответственно. А среднегодовой поток сейсмической энергии -  $9,5 \cdot 10^9$  Дж/год- км<sup>2</sup> и  $9,4 \cdot 10^9$  Дж/год- км<sup>2</sup> в Западном и Центральном блоках, соответственно.

3. Изменение кумулятивной длины сейсмогенных разрывов имеет тренд в Западном блоке:

$$\Sigma L = (0,38751t - 759,74) - 100 \text{ км},$$

а в Центральном блоке:

$$\Sigma L = (3766t - 73\,874) - 100 \text{ км}.$$

Среднегодовая скорость накопления длины разрывов составляет 357,0 км/год и 349,60 км/год в Западном и Центральном блоках, соответственно. Изменение кумулятивной величины подвижек по сейсмогенным разрывам имеет тренд в Западном блоке:

$$\Sigma U = (0,1892t - 3\,710) - 100 \text{ м},$$

а в Центральном блоке:

$$\Sigma U = (1,83911t - 3607,6) - 100 \text{ м}.$$

Скорость накопления подвижек по сейсмогенным разрывам в Западном блоке составляет 1743,8 см/год, а в Центральном блоке - 1707 см/год. Общий сейсмический момент в Западном блоке составлял около  $1,55 \cdot 10^{32}$  дин-см, а в Центральном блоке -  $1,48 \cdot 10^{32}$  дин-см. Суммарная величина сброшенного напряжения в Западном блоке -  $1,1 \cdot 10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>, а в Центральном блоке -  $1,09 \cdot 10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>.

4. Повторяемость землетрясений выражается в Западном блоке формулой:

$$\lg N = -0,5032K + 6,8359, R^2 = 0,999,$$

а в Центральном блоке:

$$\lg N = -0,4693K + 6,4702, R^2 = 0,988.$$

Время повторения ( $T_3, T_{II}$ ) землетрясений зависит от площади блока ( $S_3, B_{II}$ ) и энергетического класса землетрясений ( $K$ ), так в Западном блоке ( $T_3$ ):

$$T_3 = \frac{10^{(0,5032K - 1,5099)}}{S_3} \quad \text{а в Центральном блоке } (T_{II}): T_{II} = \frac{10^{(0,4693K - 0,3764)}}{S_{II}}$$

**Литература:**

1. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. - 264 с.
2. Aki, K. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 14, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G wave spectrum. // Bulletin of the Earthquake Research Institute. - 1966.-v. 44.-pp. 73-88.
3. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. Bishkek, 2004. - 166p.
4. Omuralieva A., Nakajima J., Hasegawa A. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: Implications for large- and small-scale mountain building. J. Tectonophysics 465, 2009, pp. 30-44.

**Рецензент: д.г-м.н. Абдрахматов К.Е.**