

УДК 550.34

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

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Аннотация. На основании изучения динамики последовательности проявления землетрясений отмечено, что повторяемость событий определяется иерархией сейсмических циклов. Период повторения событий выражается формулой:

$$\lg TD = 0.6973M_w - 4.0347, R^2=0.98,$$

где TD- средний период повторения (год), который определяется из неравных промежутков времени между землетрясениями, M_w - моментная магнитуда, R^2 - достоверность аппроксимации. Оценка периода повторения землетрясений имеет неопределённость. Мерой неопределённости может быть стандартное отклонение S промежутков времени в последовательности определённого класса $M_w \pm \Delta M_w$:

$$\lg S = 0.6017 M_w - 3.5545, R^2 = 0.97.$$

Неопределённость периода повторения уменьшится слежением основных сейсмических циклов.

Ключевые слова: последовательность землетрясений, динамика последовательности, период повторения, закон повторяемости Гутенберга-Рихтера, иерархия сейсмических циклов.

ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДҮН ПАЙДА БОЛУУ ЫРААТТУУЛУГУНУН СЫЗЫКТУУ ЭМЕС ДИНАМИКАСЫ

Кыскача мазмуну. Жер титирөөлөрдүн пайда болуу ырааттуулугунун динамикасын изилдөөнүн негизинде окуялардын кайталануучулугу сейсмикалык циклдердин иерархиясы менен аныктала тургандыгы белгиленген. Жер титирөөлөрдүн кайталануу мезгили төмөнкү формула менен туюндурулат:

$$\lg TD = 0.6973M_w - 4.0347, R^2=0.98,$$

мында, TD- кайталануунун орточо мезгили (жыл), жер титирөөлөрдүн ортосундагы бирдей эмес убакыт аралыктарынан аныкталат, M_w -момент магнитудасы, R^2 -аппроксимациянын аныктыгы. Жер титирөөлөрдүн кайталануу мезгилин баалоодо аныксыздык бар. Белгилүү бир класстагы $M_w \pm \Delta M_w$ удаалаштыктагы S мезгил аралыктарынын стандарттуу четтөөсү аныксыздыктын ченеми болушу мүмкүн:

$$\lg S = 0.6017 M_w - 3.5545, R^2 = 0.97.$$

Кайталануу мезгилинин аныксыздыгы негизги сейсмикалык циклдерге байкоо жүргүзүү азаят.

Негизги сөздөр: жер титирөөлөрдүн ырааттуулугу, ырааттуулуктун динамикасы, Гутенберг-Рихтердин кайталануу закону, сейсмикалык мерчимдердин (циклдердин) иерархиясы, сейсмикалык процесстердин универсалдуу параметри, жер титирөөлөрдүн ырааттуулугунун динамикасын шайкештөө (синхронизация).

NONLINEAR DYNAMICS OF THE SEQUENCE OF EARTHQUAKE MANIFESTATIONS

Abstract. Based on the study of the dynamics of earthquakes manifestation sequence, it is noted that the events recurrence is determined by the hierarchy of seismic cycles. Events' recurrence period is expressed by the formula:

$$\lg TD = 0.6973M_w - 4.0347, R^2 = 0.98,$$

where TD is the average period of recurrence (year), which is determined from unequal time intervals between earthquakes, M_w is the moment magnitude, R^2 is the coefficient of determination or R-squared value. Earthquake recurrence period assessment has uncertainty. Standard deviation S of time intervals in the sequence of a certain magnitude $M_w \pm \Delta M_w$ can be measure of uncertainty:

$$\log S = 0.6017 M_w - 3.5545, R^2 = 0.97.$$

Uncertainty of the recurrence period will be reduced by tracking the main seismic cycles.

Keywords: sequence of earthquakes, period of recurrence, Gutenberg-Richter law, hierarchy of seismic cycles.

Введение

Динамика последовательности проявления землетрясений предопределена динамикой иерархии активных разломов и блоков [1-3]. Последовательность землетрясений выражена иерархией сейсмических циклов, которая является универсальным параметром сейсмических процессов. Эти циклы нелинейные и описываются нелинейными полиномами. В каждом цикле выделяется период активизации, пик сейсмической активизации, период спада сейсмической активизации и период сейсмического затишья. Крупные землетрясения появляются в цикле первого порядка с длинным периодом, значительные и малые землетрясения – в циклах с соответствующими короткими периодами. В связи с этим изучение повторяемости землетрясений является актуальной проблемой для оценки сейсмической опасности и главной целью сейсмологии на современном уровне.

Ещё в 50 - годы Гутенберг и Рихтер [4] изучали связь магнитуды и среднегодового числа землетрясений ($M \geq 6.0$) всего Земного шара за 1904-1952 гг. и «вывели» эмпирическую формулу повторяемости событий:

$$\lg N = 0.48 + 0.9 * (8 - M), \quad (1)$$

где N – средняя годовая частота землетрясений определённого района за рассматриваемый период времени, M – класс магнитуды в интервале $\pm \Delta M$. Величина $1/N$ представляет собой осреднённый промежуток времени проявления отдельно взятого класса магнитуды $M \pm \Delta M$. График формулы (1) является линейным.

С.А Федотов [5] по данным крупных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной части Японии отметил сейсмический цикл продолжительностью 140 ± 60 лет. Кавасуми [6] на основе фурье-анализа сильных землетрясений районов Токио и Южного Канто выделил $69 (\pm 13)$ -летний цикл.

Shimazaki [7] и Касахара [8] динамику проявления землетрясений и их повторяемость «связали» со «ступенчатыми» изменениями деформаций и напряжений (статическим, динамико-кинематическим) в зоне разлома. На основании данных смещения поверхности земли отмечены сейсмические циклы и в каждом из них выделены косейсмическая, предсейсмическая, постсейсмическая и межсейсмическая подвижки [8].

На основе Фурье-анализа значительных землетрясений Тянь-Шаня и приграничных районов Памира и Тарима [9] отмечено, что сходимость эмпирических и расчётных временных рядов землетрясений можно достичь большим числом (100 и более) гармонических составляющих. Однако, выбор нескольких доминирующих периодов на спектральной функции недостаточен для описания последовательности сильных землетрясений. На основе фрактального анализа сейсмичности Тянь-Шаня [10] установлено, что сейсмический процесс может быть отнесён к процессу, обладающему «положительной» памятью, где фрактальные параметры $2 < d \leq 3$ ($0 \leq \mu < 0.5$, $0.5 < H \leq 1$), и к процессу, обладающему «отрицательной» памятью, где $1 \leq d < 2$ ($0.5 < \mu \leq 1$, $0 \leq H < 0.5$). Следует напомнить, что к процессам с памятью относятся, в частности, сейсмические циклы.

Выражение (1) широко используется в мировой практике и принято, как закон повторяемости землетрясений «Гутенберга-Рихтера». Однако в реальности промежуток времени определённого класса магнитуд изменяется в их последовательности. В связи с этим можно сказать, что средняя годовая частота землетрясений и соответствующий осреднённый промежуток времени в (1) являются приближёнными характеристиками повторяемости землетрясений с относительно малой точностью.

Методика и результаты исследований. На рисунке 1 показана последовательность проявления сильных землетрясений с $M = 6.8 - 7.6$ за 1942-1967 гг. в Анатолийском разломе на территории Турции (за исключением землетрясения 1939, $M=8.0$).

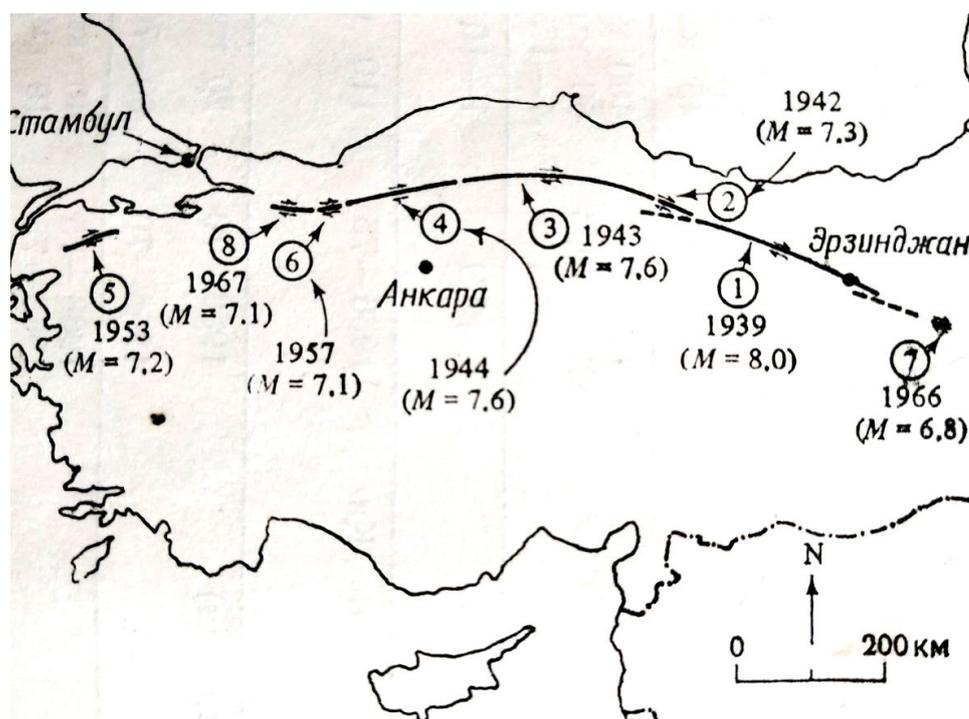


Рисунок 1. Пространственно-временное распределение сильных землетрясений ($M \geq 6.8$) зоны Анатолийского разлома за 1939-1967 гг. [11].

На графике динамики сейсмичности - последовательности проявления землетрясений, отмечается чередование периодов активизации (1942-1944 гг., 1966-1967 гг.) и затишья (рисунок 2). Линейный тренд выражается формулой:

$$y = 4.7857x + 1934, R^2 = 0.94, \quad (2)$$

где y - время проявления землетрясения (год), x - номер очередности землетрясений, коэффициент 4.7857 – промежуток времени, проходящий до очередного землетрясения с $M=6.8-7.6$, R^2 – достоверность аппроксимации. Нелинейный тренд выражается формулой:

$$y = -0.0644x^4 + 0.7247x^3 - 1.5417x^2 + 0.9549x + 1942, R^2 = 0.98 \quad (3)$$

и имеет относительно большую достоверность аппроксимации 0.98.

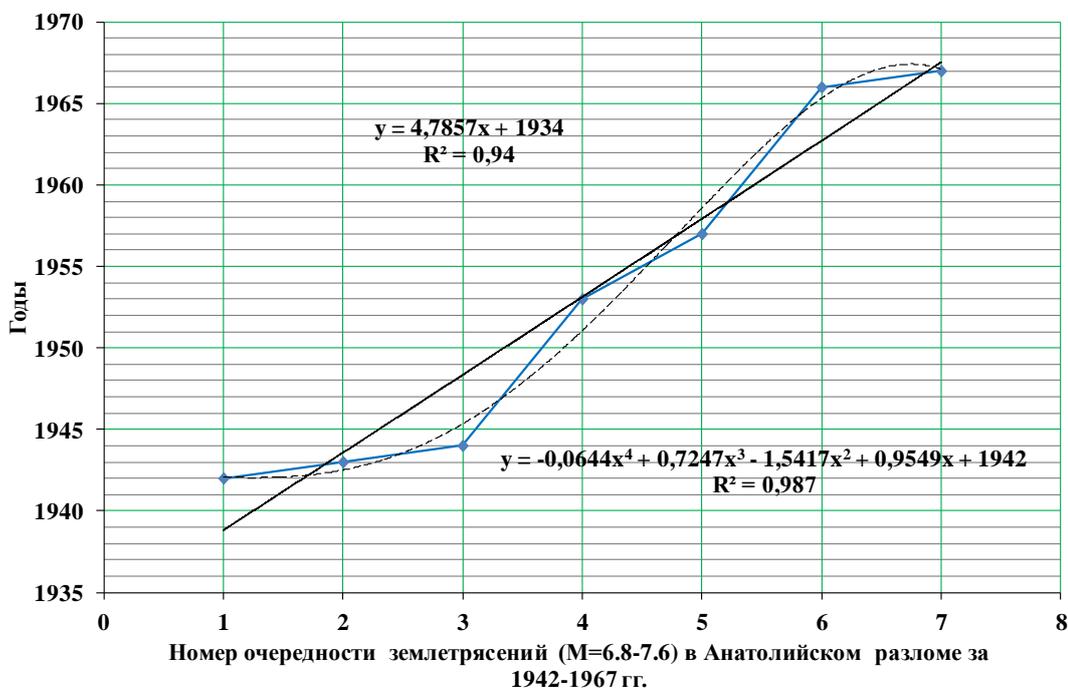


Рисунок 2. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M=6.8-7.6$ в Анатолийском разломе за 1942-1967 гг. Синяя линия отражает последовательность землетрясений, сплошная чёрная линия - линейный тренд, пунктирная линия – нелинейный тренд последовательности землетрясений.

График изменения промежутка времени между землетрясениями приведён на рисунке 3. Данный промежуток времени в Анатолийском разломе изменяется от 1 до 9 лет, имеет среднее значение по динамике последовательности землетрясений $TD = 4.13$ года, стандартное отклонение $S=3.92$. В то же время средняя годовая частота Гутенберга-Рихтера составляет $N=7/25=0.28$, промежуток времени по методике Гутенберга-Рихтера $TGR - 3.57$ года.

Динамика последовательности проявления землетрясений с $M=7.4 - 7.7$ Японско-Курильской зоны за 1918-1973 гг. приведена на рисунке 5. Линейный тренд выражается формулой:

$$y = 7.3571x + 1921.1, R^2 = 0.868, \quad (4)$$

где y - время проявления землетрясения (год), x - номер очередности землетрясений, коэффициент 7.3571- промежуток времени, проходящий до очередного землетрясения с $M=7.4-7.7$, R^2 – достоверность аппроксимации. Нелинейный тренд выражается формулой:

$$y = 0.197x^3 - 4.0043x^2 + 29.608x + 1891.2, R^2 = 0.99 \quad (5)$$

и имеет относительно большую достоверность аппроксимации 0.99.



Рисунок 3. График изменения промежутка времени между землетрясениями с $M=6.8-7.4$ Анатолийского разлома за 1942-1967 гг. Пунктирная линия - среднее значение промежутков времени $TD=4.13$, штрих пунктирная линия – $TD+S=8.05$ с учётом стандартного отклонения.

На рисунке 4 представлено пространственно-временное распределение землетрясений с $M=7.4-7.7$ Японско-Курильской зоны за 1918-1973 гг.

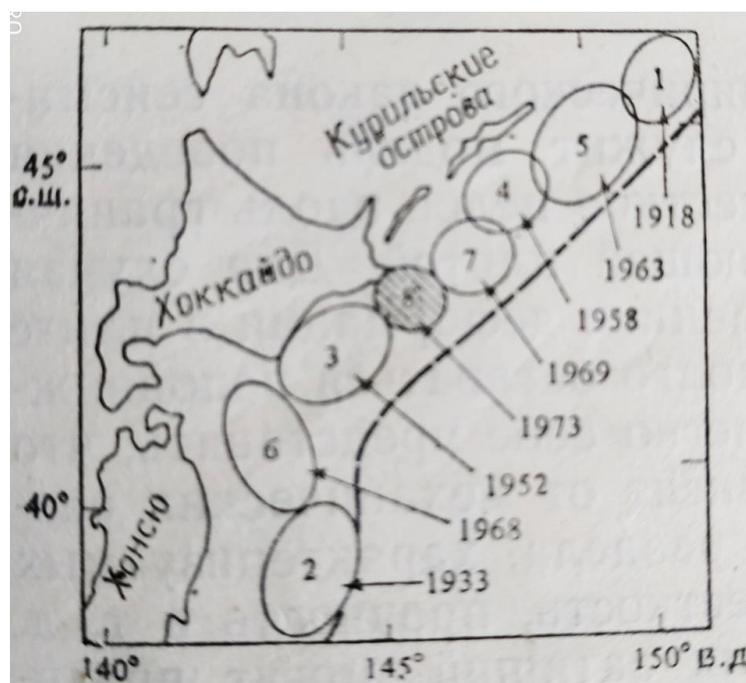


Рисунок 4. Пространственно-временное распределение землетрясений с $M=7.4-7.7$ Японско-Курильской зоны за 1918-1973 гг. [12].

Как видно из графика динамики последовательности землетрясений (рисунок 5) отмечается наращивание сейсмической активизации, особенно после 1968 г.



Рисунок 5. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M=7.4-7.7$ Японско-Курильской зоны за 1918-1973 гг. Синяя линия - последовательность землетрясений, сплошная чёрная линия - линейный тренд, пунктирная линия – нелинейный тренд последовательности землетрясений.

Изменение промежутка времени землетрясений приведёно на рисунке 6. Промежуток времени землетрясений Японско-Курильской зоны изменяется от 1 до 19 лет, имеет среднее значение $TD=7.85$ лет, стандартное отклонение $S=6.05$. В то время средняя годовая частота Гутенберга-Рихтера составляет $N=8/55=0.145$, промежуток времени $TGR=6.87$ лет.

Интересно рассмотреть динамику последовательности проявления землетрясений с $M_w = 7.9-8.4$ всего Земного шара за 1906-1970 гг. по данным Касахара [8] (таблица 1).

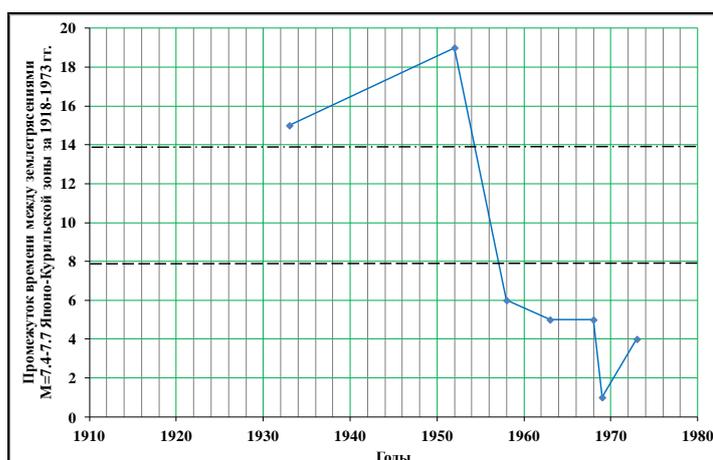


Рисунок 6. График изменения промежутков времени между землетрясениями с $M=7.4-7.7$ Японско-Курильской зоны за 1918-1973 гг. Пунктирная линия - среднее значение промежутков времени $TD=7.85$, штрих пунктирная линия – $TD+S=13.9$ с учётом стандартного отклонения.

Таблица 1. Ряд сильных землетрясений ($M_w=7.9-8.4$, $9.2-9.5$) земного шара за 1906-1970 гг. [8].

№	Событие	год	месяц	число	M_w	M_w
1	Сан-Франциско	1906	04	18	7.9	
2	Канто	1923	09	01	7.9	
3	Санрику	1933	03	02	8.4	
4	Тонанкай	1944	12	07	8.1	
5	Нанкай	1946	12	20	8.1	
6	Токати-Оки	1952	03	04	8.1	
7	Чили	1960	05	22		9.5
8	Курилы	1963	10	13	8.5	
9	Аляска	1964	03	28		9.2
10	Рэт-Айланд I	1965	02	04	8.7	
11	Перу	1966	10	17	8.1	
12	Токати-Оки	1968	05	16	8.2	
13	Курилы	1969	08	11	8.2	
14	Перу	1970	05	31	7.9	

Динамика ряда сильных землетрясений с $M_w=7.9-8.4$ всего Земного шара показана на рисунке 7. Линейный тренд выражается формулой:

$$y = 5.3792x + 1916.1, R^2 = 0.87, \quad (6)$$

где y - время проявления землетрясения (год), x - номер очередности землетрясений, коэффициент 5.3792 - промежуток времени, проходящий до очередного землетрясения с $M = 7.9-8.4$, R^2 - достоверность аппроксимации. Нелинейный тренд выражается формулой:

$$y = 0.0362x^3 - 1.3488x^2 + 17.554x + 1891.7, R^2 = 0.99 \quad (7)$$

и имеет относительно большую достоверность аппроксимации 0.99. Как видно из графика динамики последовательности землетрясений отмечается наращиванием сейсмической активизации после 1960 г., т.е. приурочены к землетрясениям Чили ($M_w=9.5$, 1960 г.) и Аляски ($M_w=9.2$, 1965 г.).

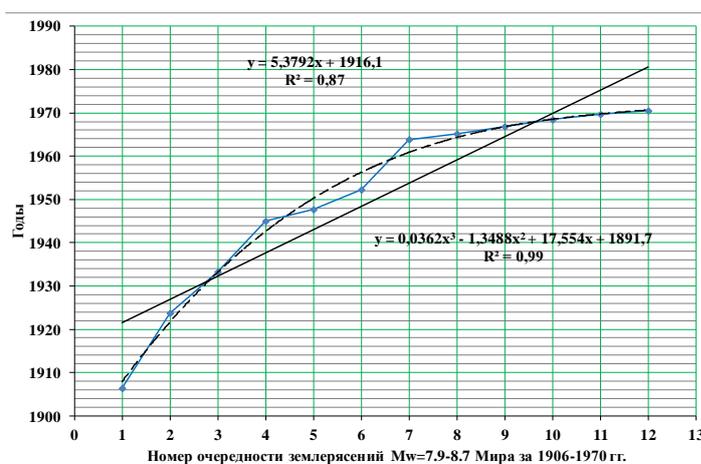


Рисунок 7. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 7.9-8.4$ всего земного шара за 1906 - 1970 гг. Синяя линия - последовательность землетрясений, сплошная чёрная линия - линейный тренд, пунктирная линия - нелинейный тренд последовательности землетрясений.

Изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 7.9 - 8.4$ всего Земного шара за 1906-1970 гг. приведено на рисунке 8. Промежуток времени этих землетрясений изменяется от 0.8 до 17.3 лет, имеет среднее значение $TD = 5.82$ года, стандартное отклонение $S=5.73$. Средняя годовая частота Гутенберга-Рихтера составляет $N=12/64=0.187$, промежуток времени $TGR=5.33$ года.



Рисунок 8. График изменения промежутка времени между землетрясениями с $M_w=7.9-8.4$ всего Земного шара за 1906-1970 гг. Пунктирная линия - среднее значение промежутков времени $TD=5.82$, штрих-пунктирная линия – $TD+S=11.55$ с учётом стандартного отклонения.

На основании вышеизложенного можно сказать, что в динамике последовательности проявления землетрясений одного и того же класса отмечаются фазы активизации с короткими промежутками времени и фазы затишья с большими промежутками, а также выделяется реальное среднее TD . Осреднённый период повторения землетрясений по Гутенбергу-Рихтеру (TGR) отличается.

Далее рассмотрим динамику последовательности проявления каждого класса землетрясений на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Исходными данными являются каталоги землетрясений Института сейсмологии НАН КР, составленные по данным сети цифровых сейсмических станций Кыргызстана, Казахстана и Узбекистана в квадрате $\varphi=39-44^\circ$ с.ш., $\lambda=69-81^\circ$ в.д.

На основании методики Канамори [13] определена связь между энергетическим классом землетрясения $K=\lg E$ (Дж) и моментной магнитудой M_w в виде соотношения:

$$M_w = 0.6667K - 3.166. \quad (8)$$

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 2.83 \pm 0.17$ Тянь-Шаня и приграничных районов за 2000-2019 гг. приведён на рисунке 9. Он имеет линейный тренд:

$$y = 0.008x + 1999.3, R^2 = 0.97, \quad (9)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.008 - промежуток времени, приходящий к очередному событию, R^2 - достоверность

аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически.

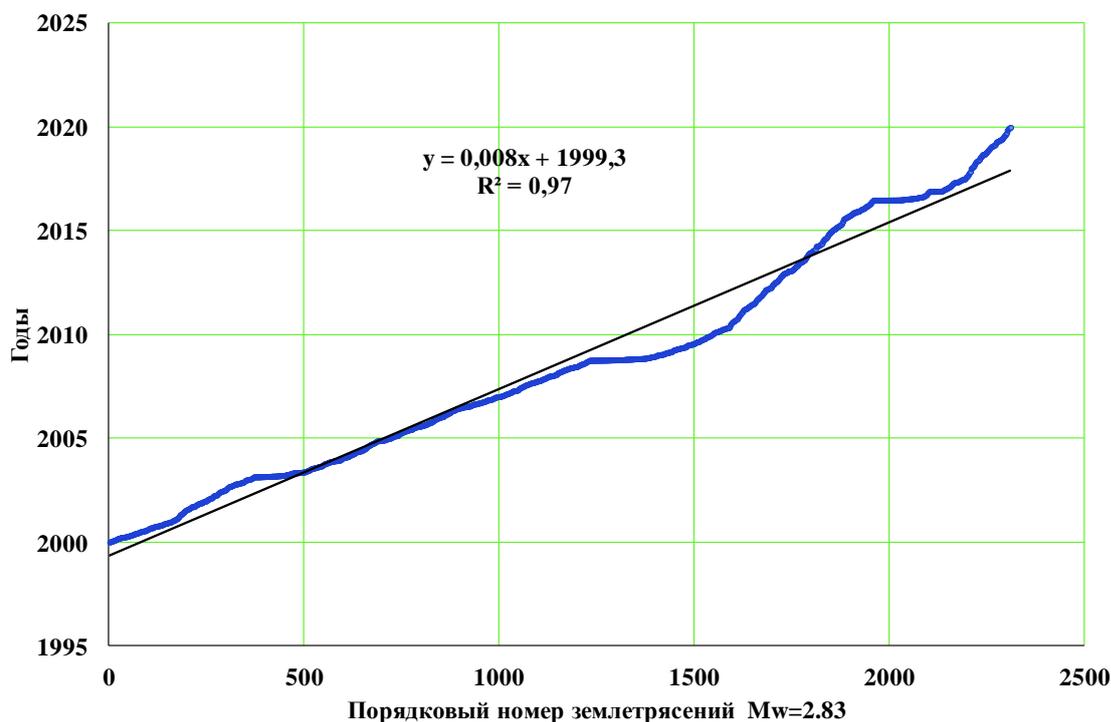


Рисунок 9. Динамика последовательности проявления землетрясений с Mw=2.83 на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 10 показано изменение промежутка времени землетрясений с Mw=2.83 на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с Mw=2.83 составляет $TD=0.008$ лет при максимальном значении 0.14 лет. Стандартное отклонение $S=0.012$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=2311/20=115,55$, период повторения $TGR=1/115.55=0.0086$ лет.

На рисунке 11 показан график динамики последовательности проявления землетрясений с $Mw = 3.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.0135x+1999.3, R^2=0.98, \quad (10)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0,01358- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически.

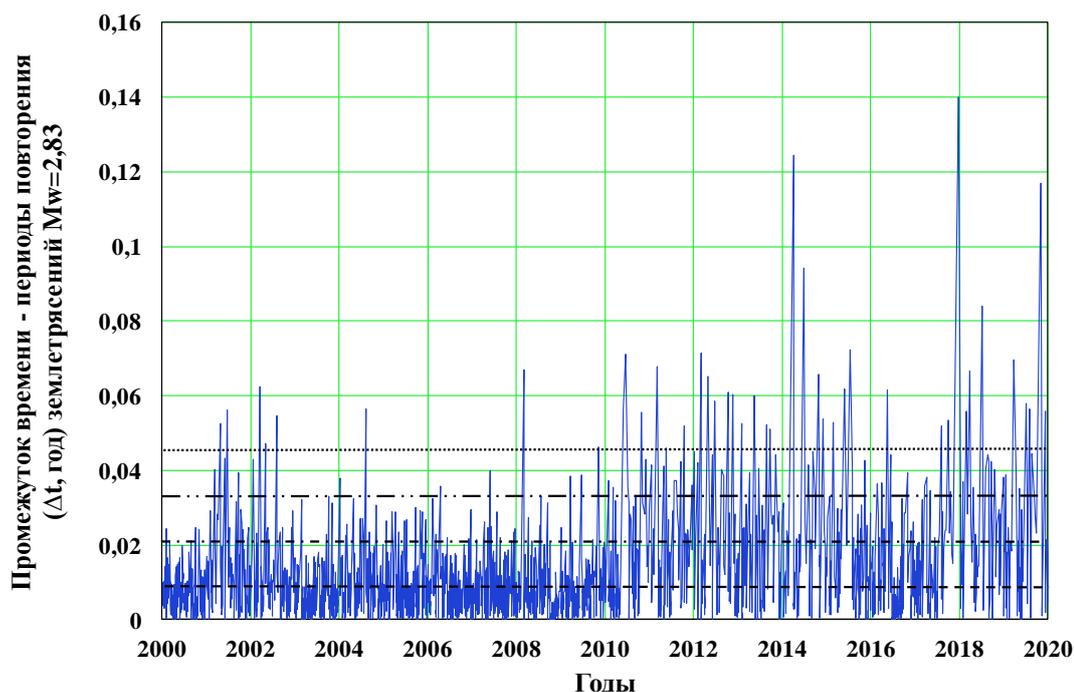


Рисунок 10. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w=2.83$ Тянь-Шаня и приграничных районов за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.008$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.012 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

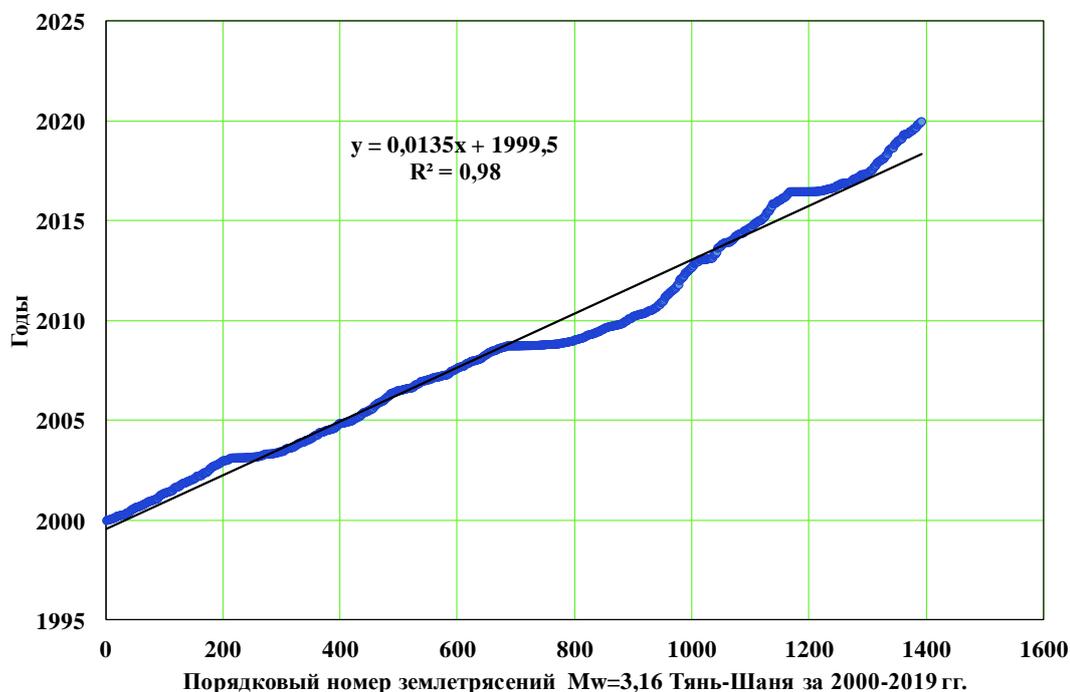


Рисунок 11. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w=3.16$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 12 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w=3.16$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение

периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w=3.16$ составляет $TD=0.014$ лет при максимальном значении 0.204 года. Стандартное отклонение $S=0.019$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=1391/20=69.55$, период повторения $TGR=1/69.554=0.014$ лет.

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 3.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. приведён на рисунке 13. Он имеет линейный тренд:

$$y = 0.0239x + 1999.9, R^2 = 0.986, \quad (11)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.0239- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически.

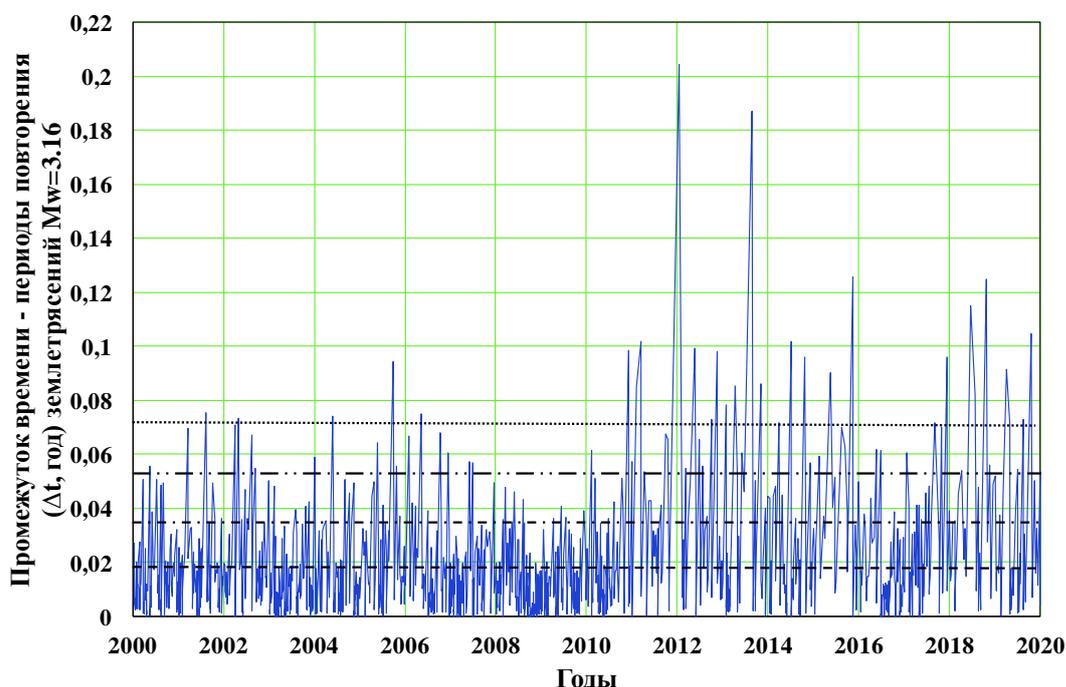


Рисунок 12. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 3.16$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия- среднее значение $TD=0.014$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.019 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия – $TD+3S$.

На рисунке 14 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w=3.5$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w=3.5$ составляет $TD=0.025$ лет при максимальном значении 0.298 лет. Стандартное отклонение $S=0.035$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=793/20=39.65$, период повторения $TGR=1/39.65=0.025$ лет.

На рисунке 15 показан график динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 3.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y = 0.0374x + 1999.1, R^2 = 0.98, \quad (12)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.0374- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие

«плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически.

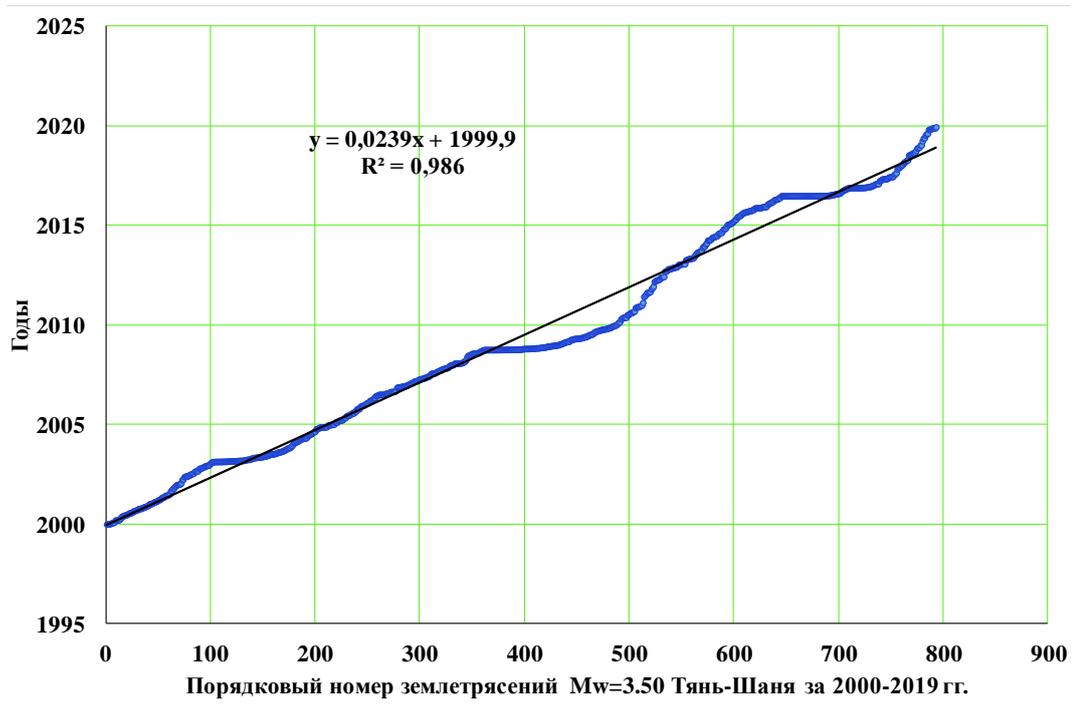


Рисунок 13. Динамика последовательности проявления землетрясений с Mw=3.5 на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

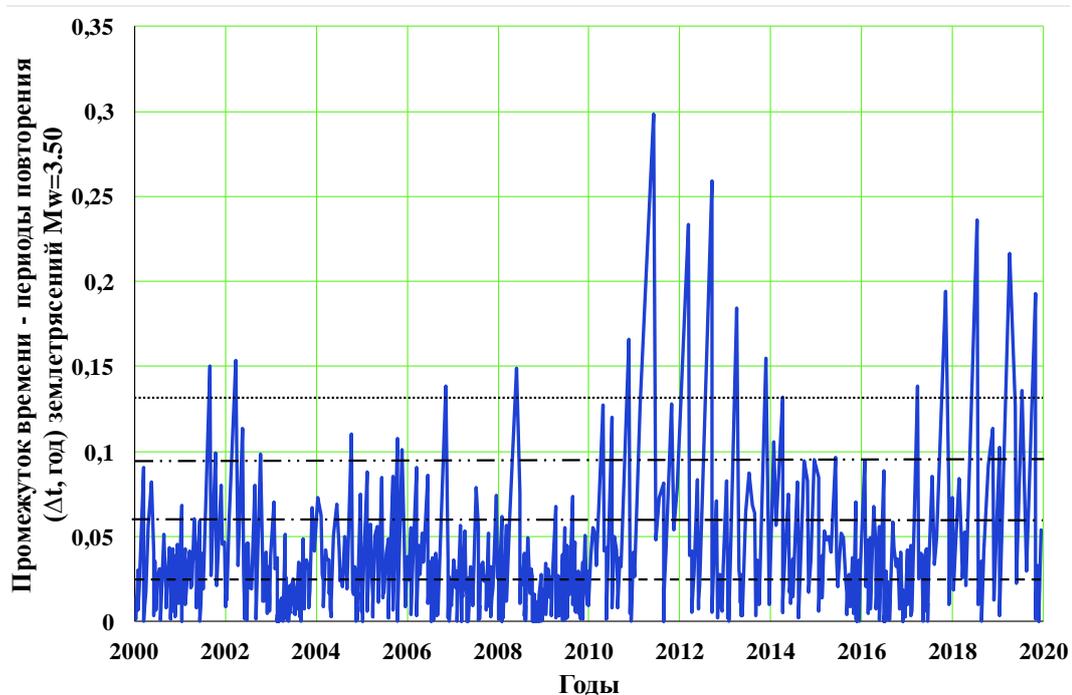


Рисунок 14. Изменение промежутка времени между землетрясениями с Mw=3.5 на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение TD=0.025 лет, штрих-пунктирная линия - TD+S с учётом стандартного отклонения 0.035 лет, пунктирная линия с двумя точками - TD+2S, точечная линия - TD+3S.

На рисунке 16 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w=3.83$ на Тянь-Шане и приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w=3.50$ составляет $TD=0.039$ лет при максимальном значении 0.345 лет. Стандартное отклонение $S=0.052$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=507/20=25.35$, период повторения $TGR=1/25.35=0.039$ лет.

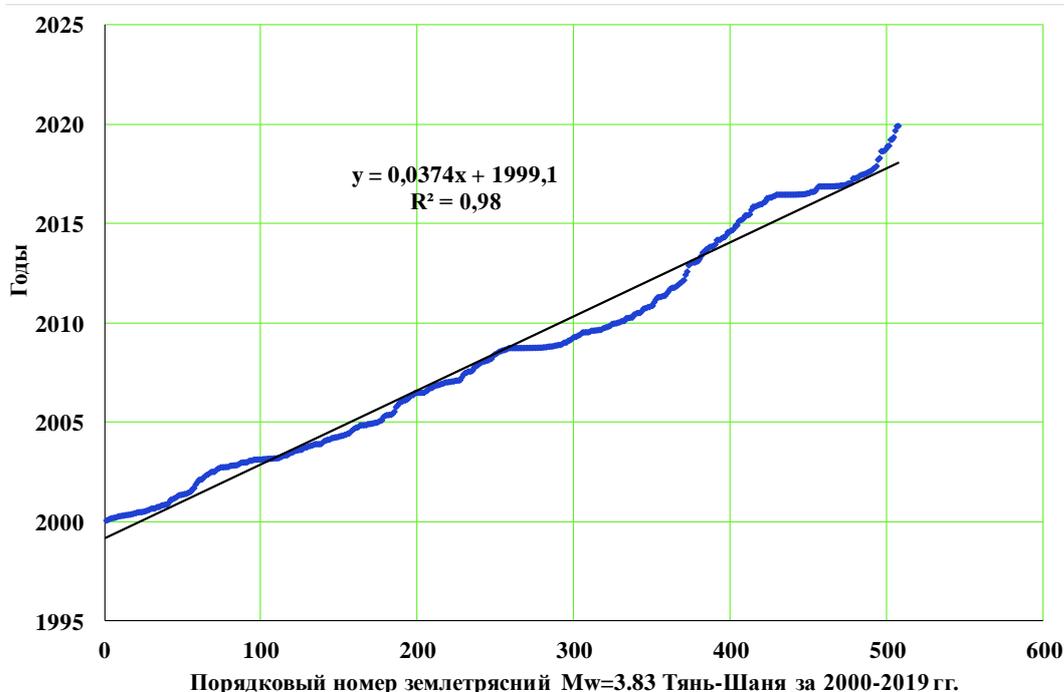


Рисунок 15. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w=3.83$ на Тянь-Шане и приграничных районах за 2000-2019 гг.

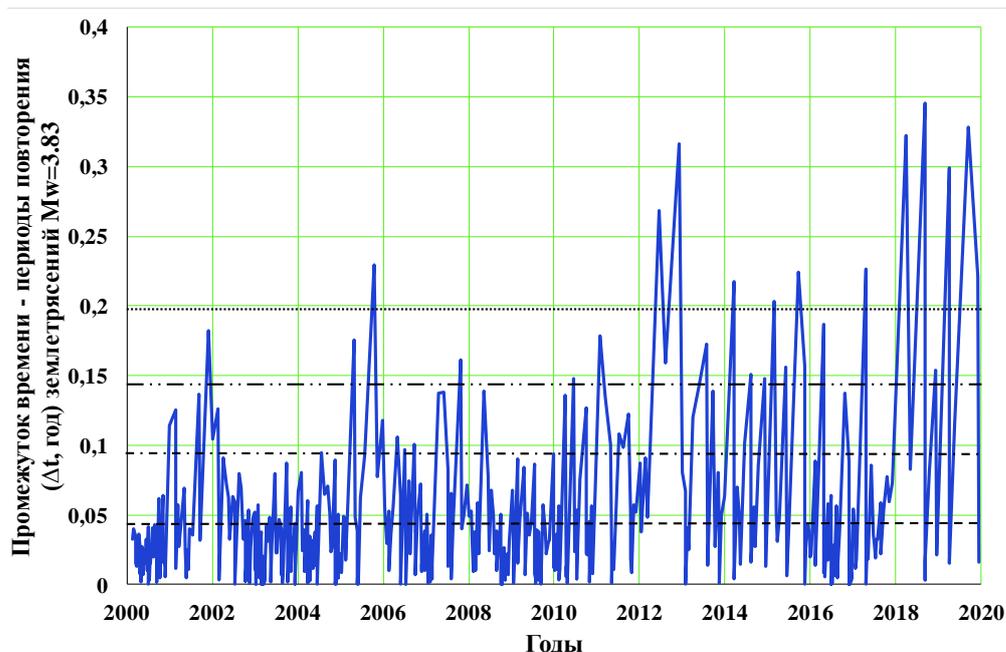


Рисунок 16. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w=3.83$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.039$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом

стандартного отклонения 0.052 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. приведён на рисунке 17. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.0695x+1998.6, R^2=0.98, \quad (13)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.0695- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически.

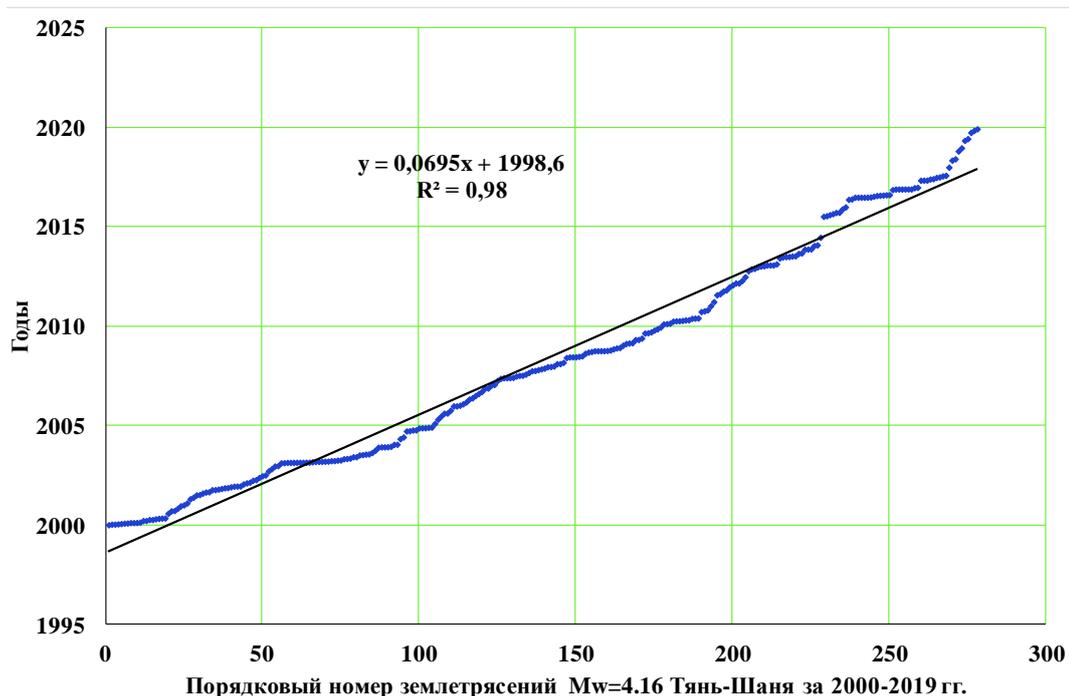


Рисунок 17. Динамика последовательность проявления землетрясений с $M_w=4.16$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 18 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 4.16$ Тянь-Шаня и приграничных районов за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 4.16$ составляет $TD=0.072$ года при максимальном значении 1.054 года. Стандартное отклонение $S=0.104$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=278/20=13.9$, период повторения $TGR=1/13.9=0.072$ года.

На рисунке 19 приведён график динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.1177x+1999.6, R^2=0.99, \quad (14)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.1177- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически и сменяются сейсмическими затишьями (подъёмами отрезка графика).

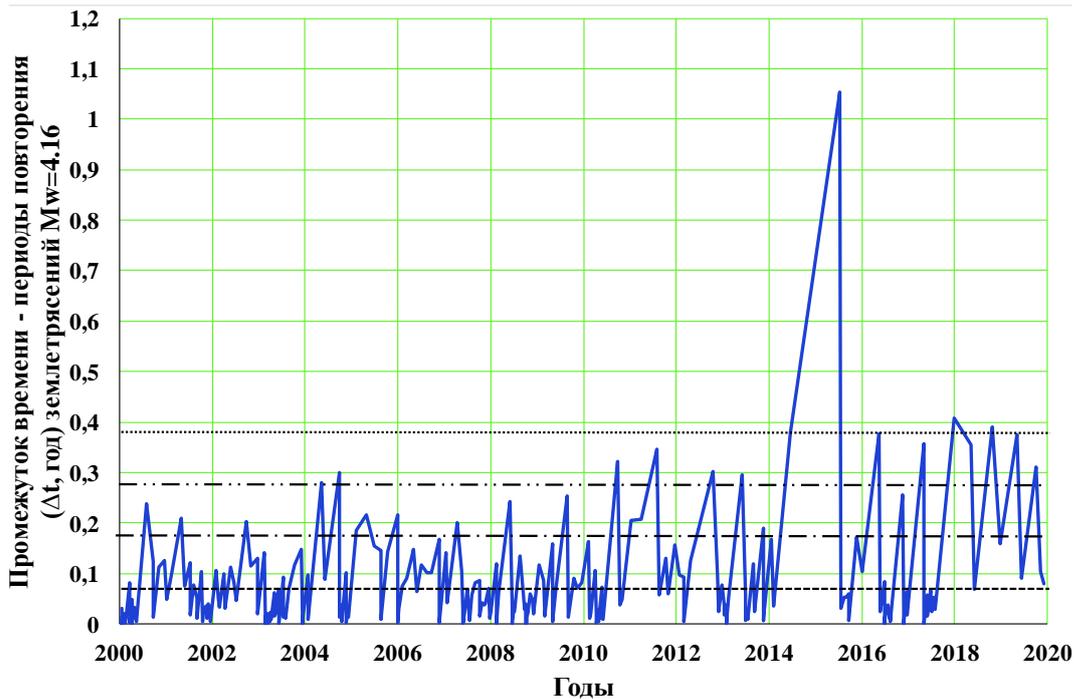


Рисунок 18. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w=4.16$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.072$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.104 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

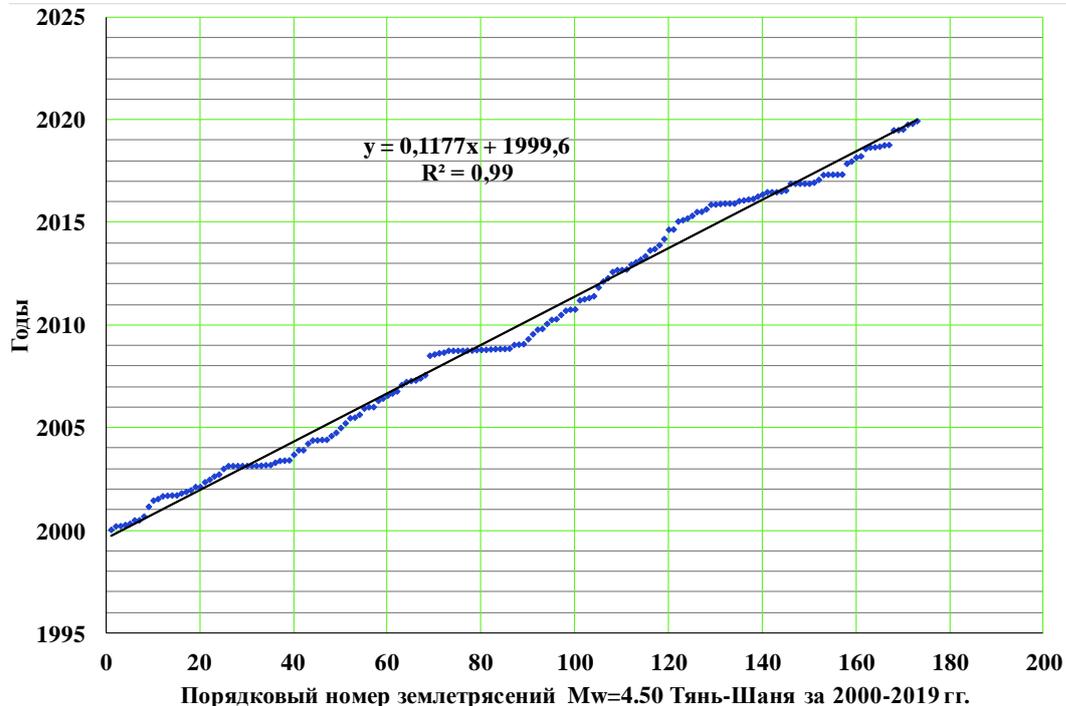


Рисунок 19. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.5$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 20 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w=4.5$ на Тянь-Шане и приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение

периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.5$ составляет $TD=0.116$ года при максимальном значении 0.95 год. Стандартное отклонение $S=0.138$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=173/20=8.65$, период повторения $TGR=1/8.65=0.115$ год.

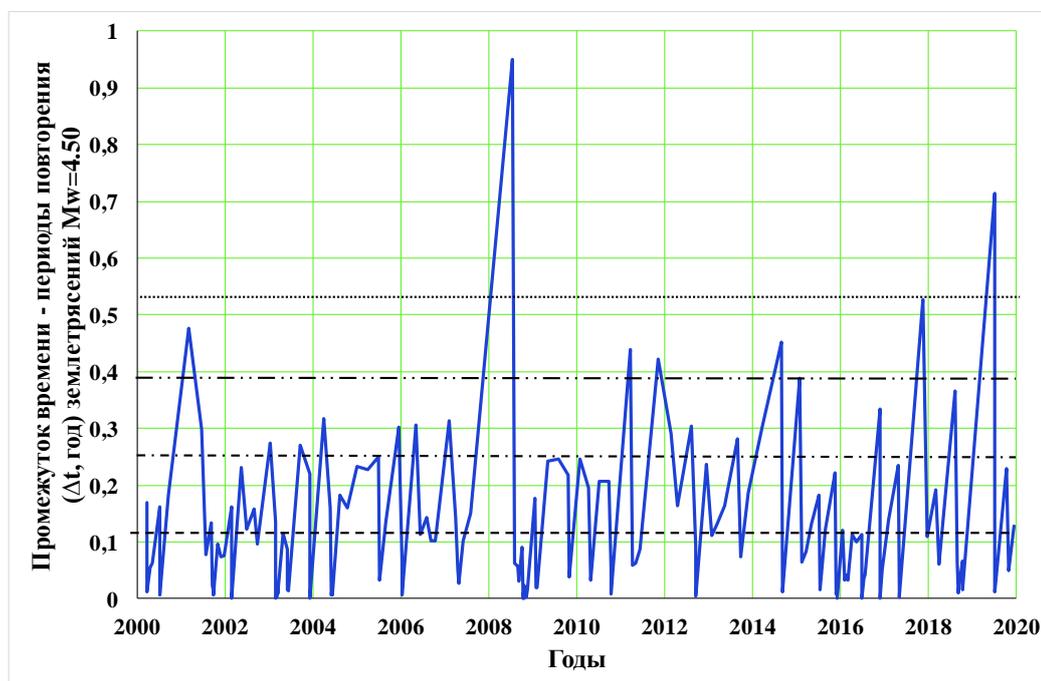


Рисунок 20. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w=4.5$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.116$ лет, штрихпунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.138 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. показан на рисунке 21. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.2387x+2000.5, R^2=0.99, \quad (15)$$

где y - время землетрясения, x - номер очередности события, коэффициент 0.2387- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически и сменяются сейсмическими затишьями.

На рисунке 22 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 4.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.83$ составляет $TD=0.243$ года при максимальном значении 1.95 лет. Стандартное отклонение $S=0.322$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=79/20=3.95$, период повторения $TGR=1/3.95=0.25$ лет.

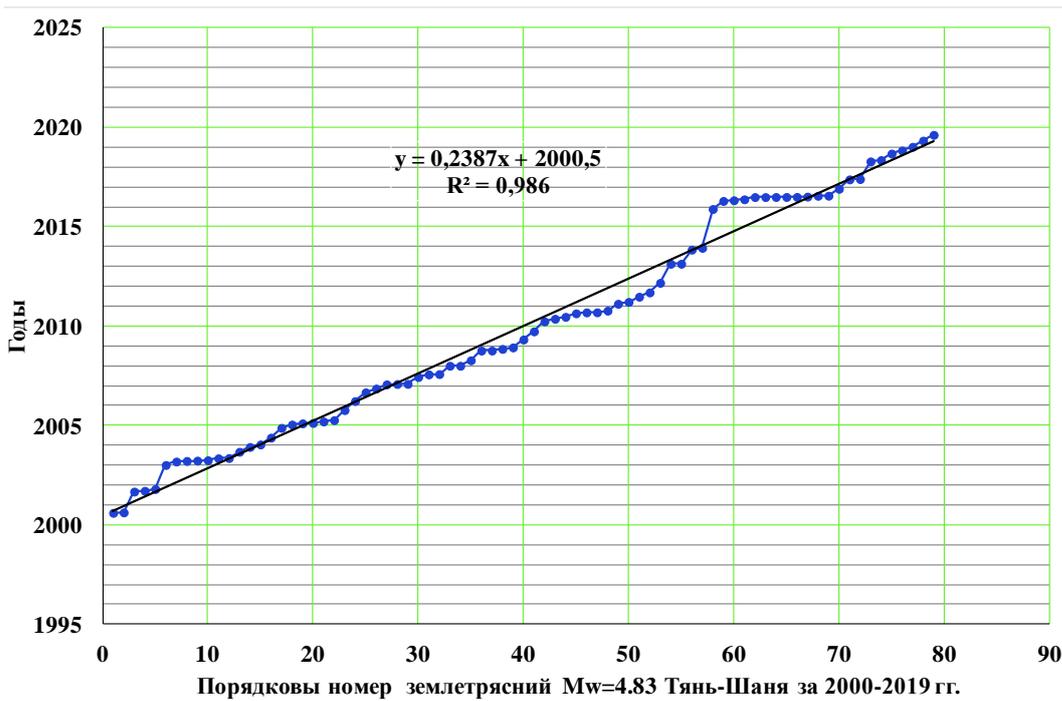


Рисунок 21. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w=4.83$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

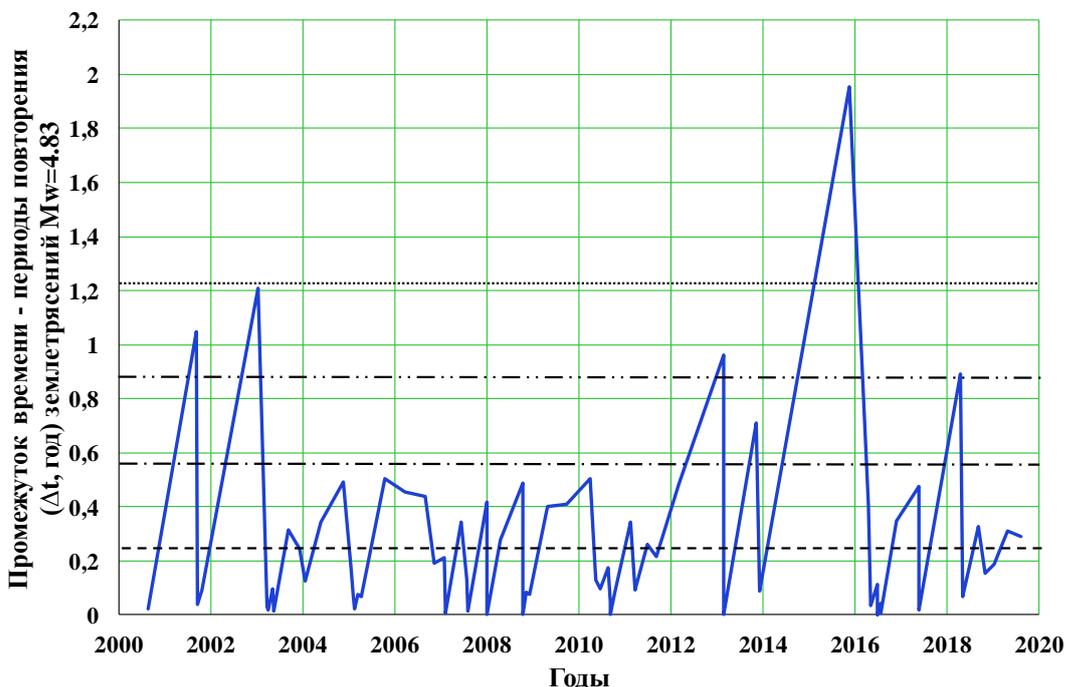


Рисунок 22. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 4.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.322$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.243 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. показан на рисунке 23. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.4076x+2003.5, R^2=0.97, \quad (16)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.4076- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически и сменяются сейсмическими затишьями.

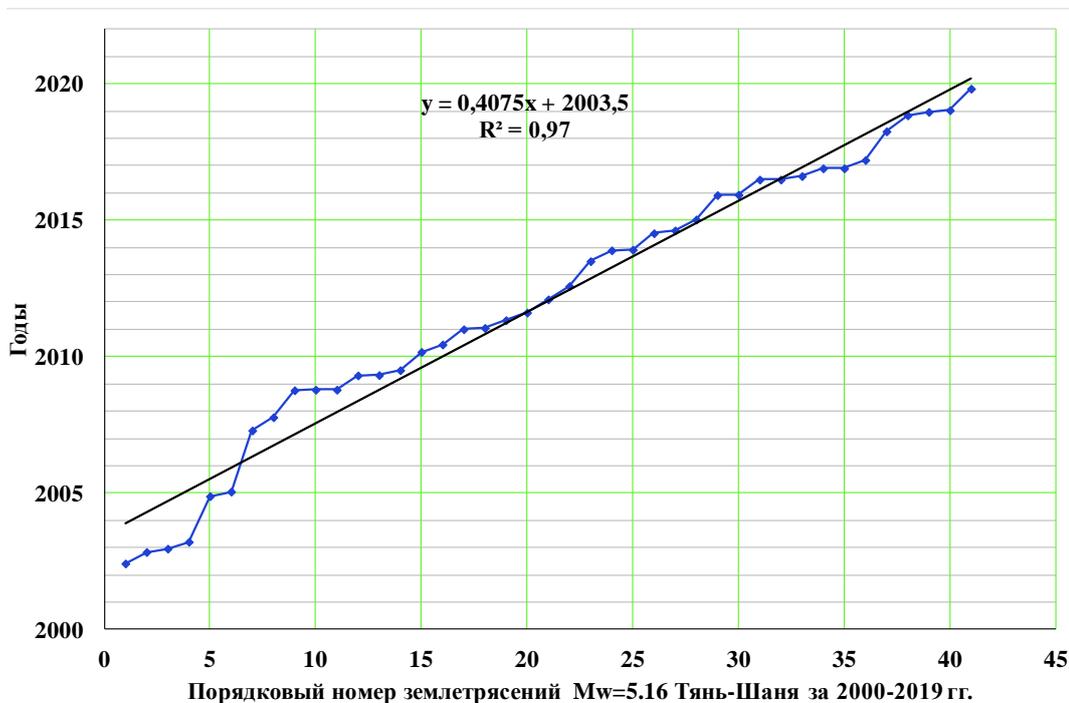


Рисунок 23. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 24 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ составляет $TD=0.435$ лет при максимальном значении 2.24 года. Стандартное отклонение $S=0.464$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=41/20=2.05$, период повторения $TGR=1/2.05=0.488$ лет.

На рисунке 25 приведён график динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.50 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y=0.961x+2000.2, R^2=0.98, \quad (17)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 0.961- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие «плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически и сменяются сейсмическими затишьями.

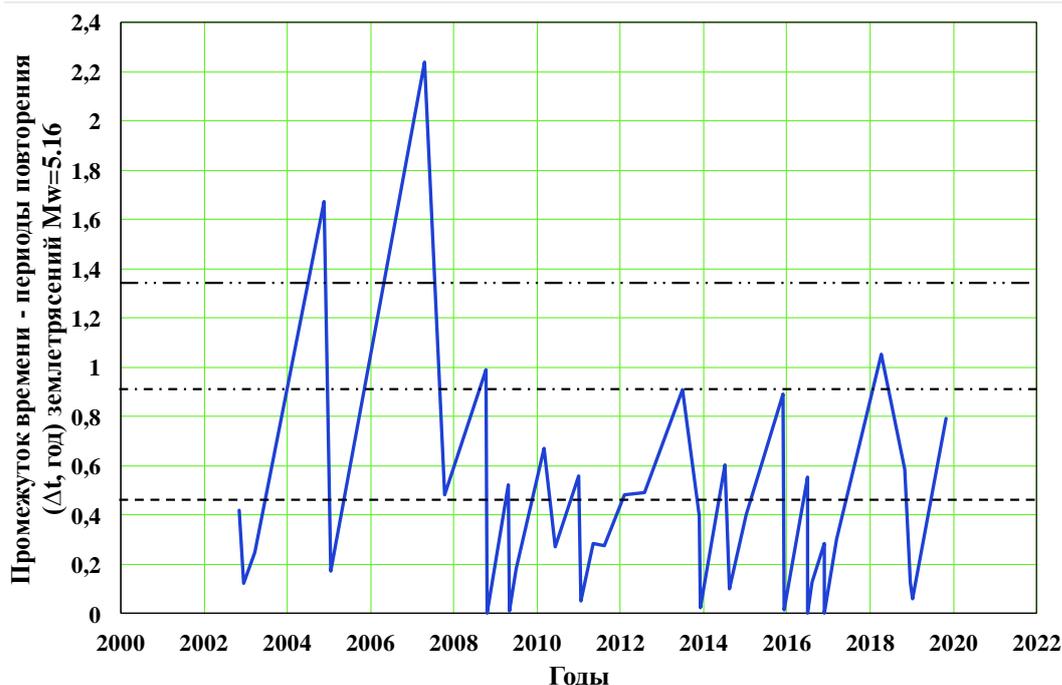


Рисунок 24. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.435$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.464 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия – $TD+3S$.

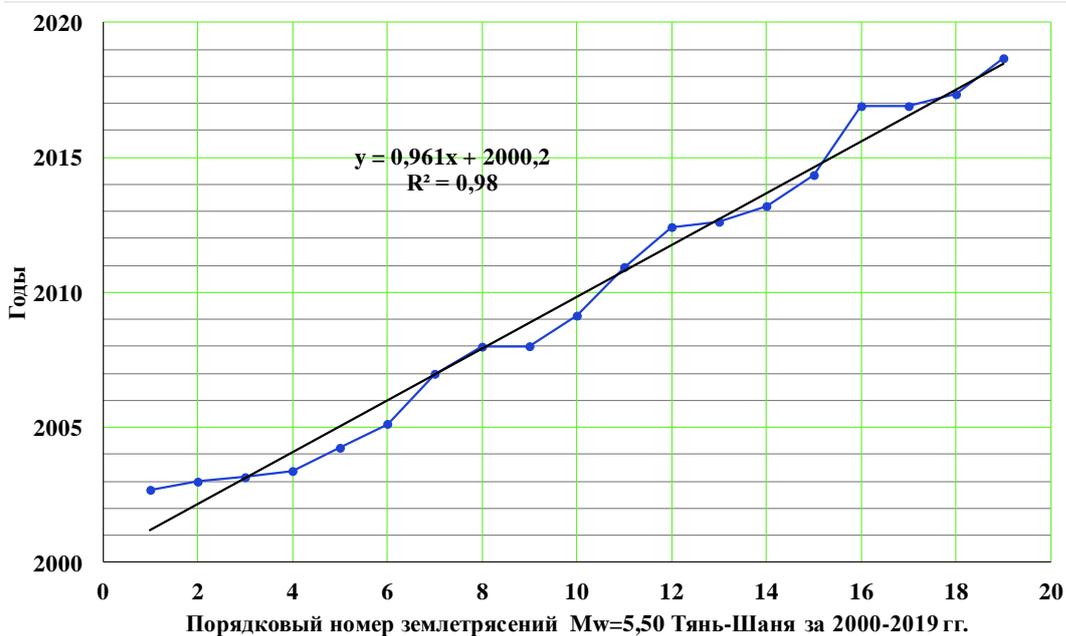


Рисунок 25. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.50 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 26 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 5.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.16 \pm 0.17$ составляет $TD=0.888$ года при максимальном значении 2.555 года.

Стандартное отклонение $S=0.722$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=19/20=0.95$, период повторения $TGR=1/0.95=1.05$ года.

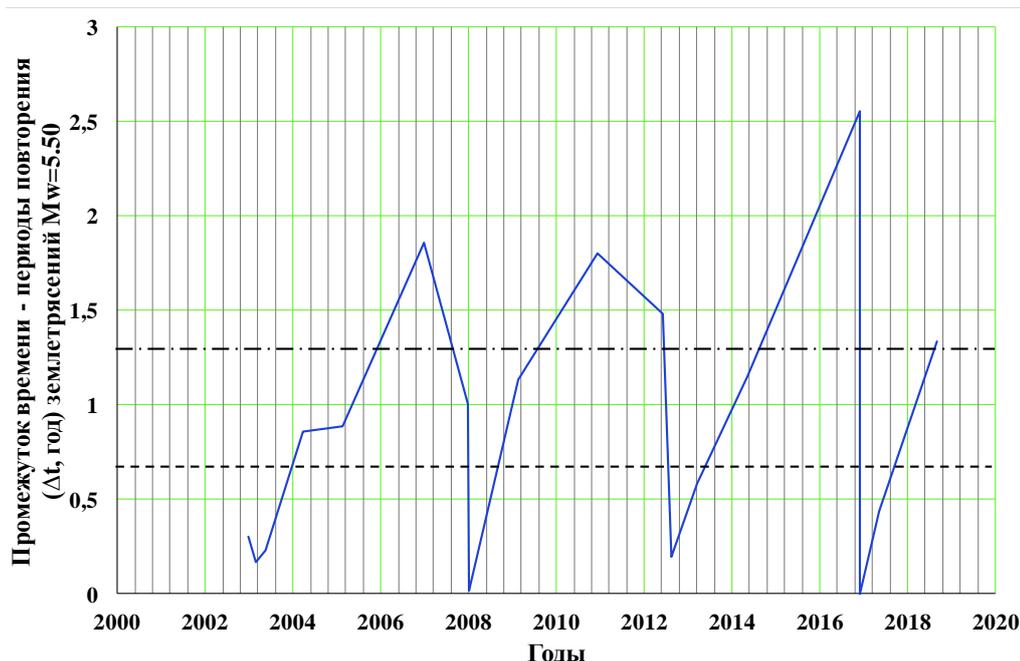


Рисунок 26. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 5.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=0.888$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.722 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия – $TD+3S$.

График динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. приведён на рисунке 27. Он имеет линейный тренд:

$$y=1.448x+2004.4, R^2=0.97, \quad (18)$$

где y - время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 1.448 - время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. В 2009 г. в последовательности землетрясений отмечалась активизация.

На рисунке 28 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 5.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.83 \pm 0.17$ составляет $TD=1.42$ года при максимальном значении 2.71 год. Стандартное отклонение $S=0.67$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=8/20=0.40$, период повторения $TGR=1/0.95=2.5$ года.

На рисунке 29 приведён график динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y=1.7324x+1999.1, R^2=0.94, \quad (19)$$

где y – время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 1.448 - время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. Пологие

«плечики» на графике выражают сейсмическую активизацию. Они проявляются периодически и сменяются сейсмическими затишьями.

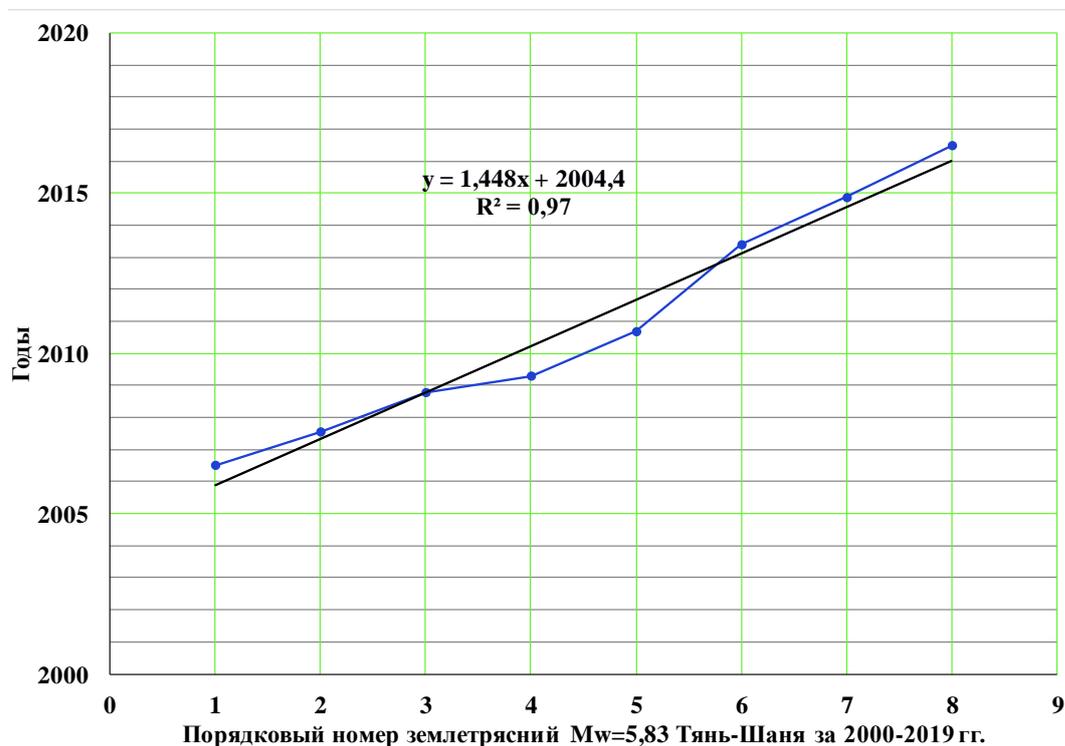


Рисунок 27. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 5.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.



Рисунок 28. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 5.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=1.42$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 0.67 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия - $TD+3S$.

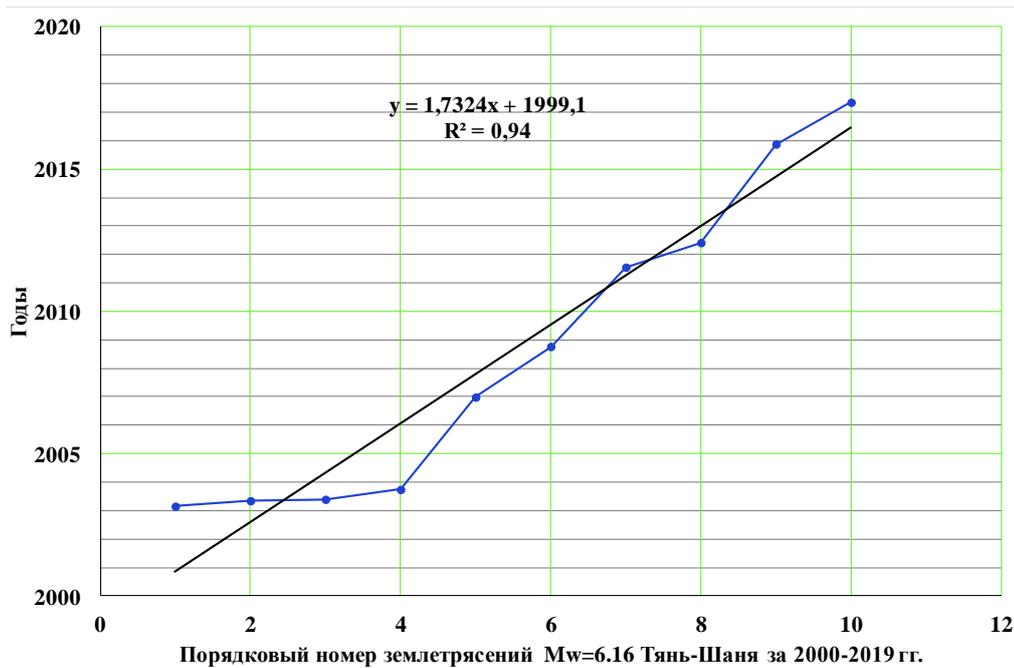


Рисунок 29. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 30 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 6.16 \pm 0.17$ Тянь-Шаня и приграничных районов за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.16 \pm 0.17$ составляет $TD=1.577$ лет при максимальном значении 3.46 года. Стандартное отклонение $S=1.329$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=10/20=0.50$, период повторения $TGR=1/0.5=2.0$ года.

На графике динамики сейсмичности - последовательности проявления (четырёх) землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ за 2000-2019 гг. отмечается (рисунок 31) линейный и нелинейный тренды. Линейный тренд выражается формулой:

$$y = 4.7273x + 1996.3, R^2 = 0.88, \quad (20)$$

где y - время проявления землетрясения (год), x - номер очередности землетрясений, коэффициент 4.7273 - промежуток времени, приходящий к очередному из землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$, R^2 - достоверность аппроксимации. В то время нелинейный тренд выражается формулой:

$$y = 1.9642x^2 - 5.0936x + 2006.3, R^2 = 0.999 \quad (21)$$

и имеет относительно большую достоверность аппроксимации 0.999.

На рисунке 32 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ составляет $TD=4.71$ год при максимальном значении 8.57 лет. Стандартное отклонение $S=3.93$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=4/20=0.20$, период повторения $TGR=1/0.2=5.0$ лет.

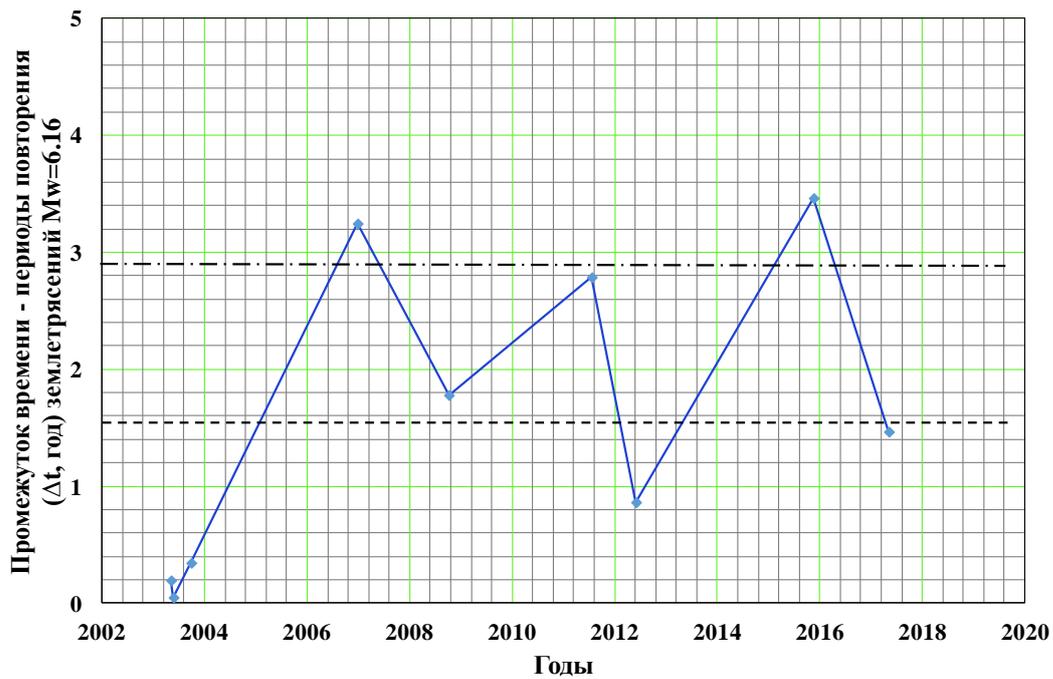


Рисунок 30. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 6.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение $TD=1.577$ лет, штрих пунктирная линия - $TD+S$ с учётом стандартного отклонения 1.329 лет, пунктирная линия с двумя точками - $TD+2S$, точечная линия – $TD+3S$.

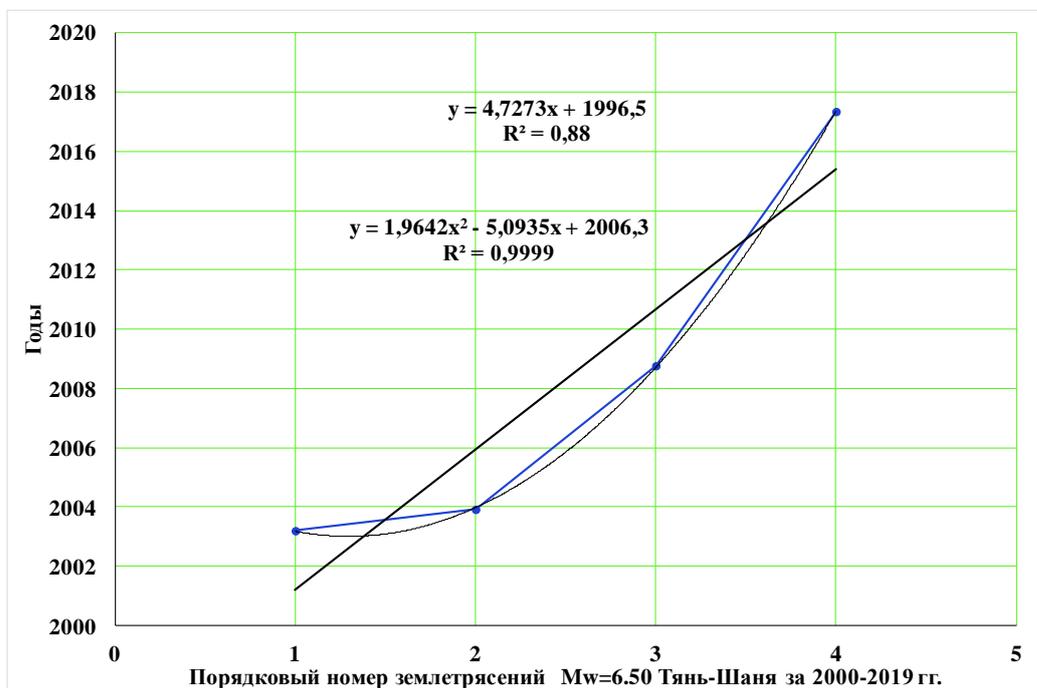


Рисунок 31. Динамика последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг. Последовательность землетрясений обозначена синей линией с точками

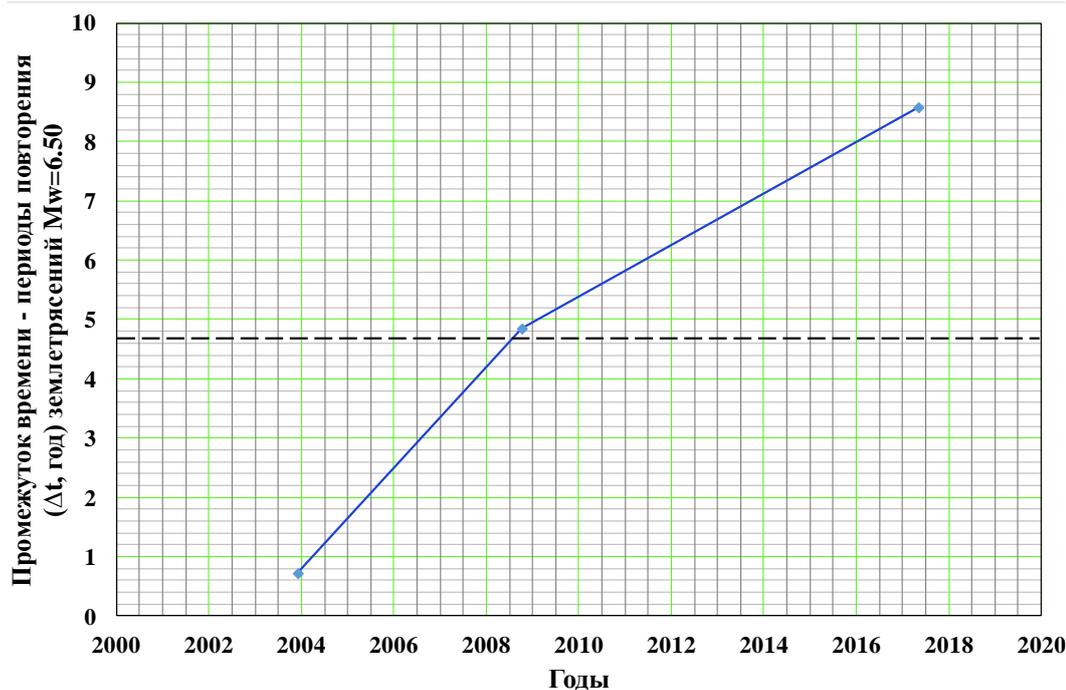


Рисунок 32. Изменение промежутка времени между землетрясениями с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг.

На рисунке 33 приведён график динамики последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шаня и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Он имеет линейный тренд:

$$y=3.4633x+1998.6, R^2=0.95, \quad (22)$$

где y – время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 3.4633- время, приходящее на очередное событие, R^2 - достоверность аппроксимации. В 2003-2007 гг. отмечалась сейсмическая активизация.

На рисунке 34 показано изменение промежутка времени землетрясений с $M_w = 6.83 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Среднее значение периода повторения по динамике последовательности проявления землетрясений с $M_w = 6.5 \pm 0.17$ составляет $TD=3.3$ года при максимальном значении 6.05 лет. Стандартное отклонение $S=1.94$. По методу Гутенберга-Рихтера средняя годовая частота $NGR=5/20=0.25$, период повторения $TGR=1/0.25=4.0$ год.

График последовательности проявления двух землетрясений с $M_w = 7.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. представлен с трендом:

$$y=8.1369x+2000.6, \quad (23)$$

где y – время землетрясения, x – номер очередности события, коэффициент 8.1369- время, приходящее на очередное событие.

На основании вышеизложенных результатов изучения динамики последовательности проявления землетрясений с: $M_w = 2.83 \pm 0.17, 3.16 \pm 0.17, 3.5 \pm 0.17, 3.83 \pm 0.17, 4.16 \pm 0.17, 4.5 \pm 0.17, 4.83 \pm 0.17, 5.16 \pm 0.17, 5.5 \pm 0.17, 5.83 \pm 0.17, 6.16 \pm 0.17, 6.5 \pm 0.17, 6.83 \pm 0.17, 7.16 \pm 0.17$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг. отмечено, что повторяемость событий определяется функцией $TD(M_w)$

среднего промежутка времени TD между землетрясениями от моментной магнитуды Mw и функцией S(Mw) стандартного отклонения промежутков времени от магнитуды (рисунки 35, 36).

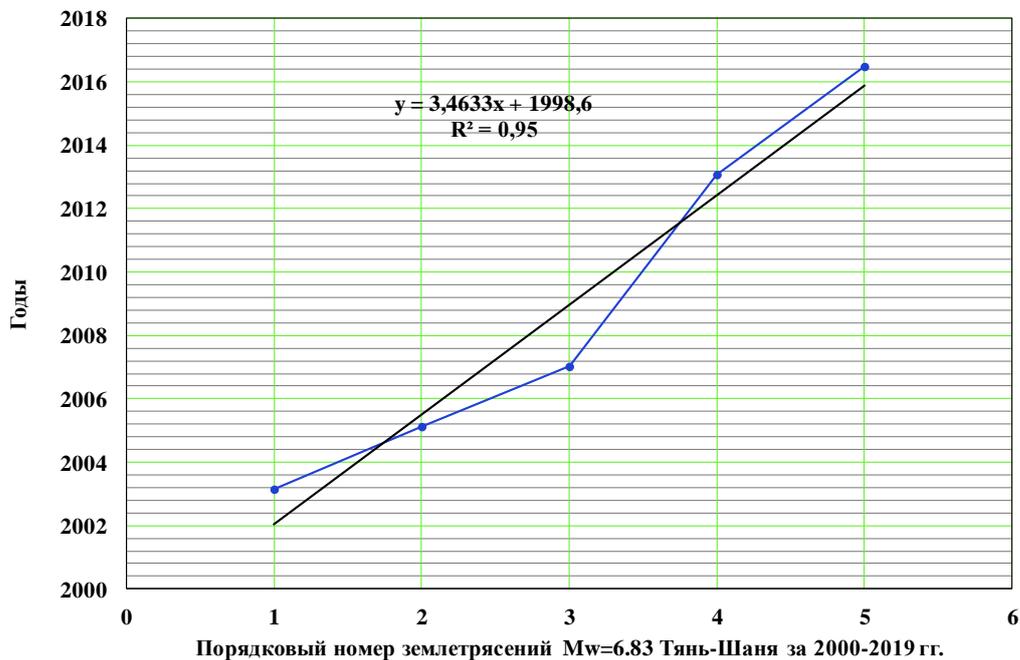


Рисунок 33. Динамика последовательности проявления землетрясений с Mw = 6.83 ± 0.17 на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.



Рисунок 34. Изменение промежутка времени между землетрясениями с Mw = 6.83 ± 0.17 на Тянь-Шане и в приграничных районах за 2000-2019 гг. Пунктирная линия - среднее значение TD=3.3 года, штрих пунктирная линия - TD+S с учётом стандартного отклонения 1.94 года, пунктирная линия с двумя точками - TD+2S, точечная линия – TD+3S.

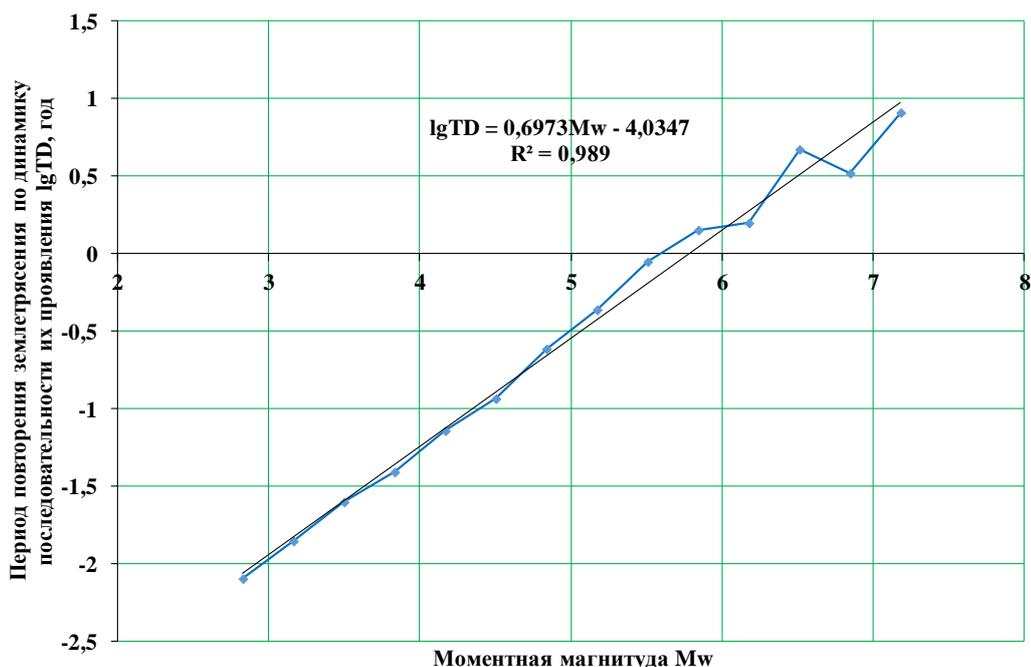


Рисунок 35. График повторяемости средних периодов землетрясений по динамике последовательности проявления событий на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг.

Данный график повторяемости средних периодов землетрясений имеет линейный тренд:

$$\lg TD = 0.6973 Mw - 4.0347, R^2 = 0.989, \quad (24)$$

где TD- средний период времени (год), Mw- моментная магнитуда, R^2 – достоверность аппроксимации.

График функции стандартного отклонения S промежутков времени землетрясений имеет линейный тренд:

$$\lg S = 0.6017 Mw - 3.5545, R^2 = 0.97, \quad (25)$$

где S - стандартное отклонение промежутков времени определённого класса $Mw \pm \Delta$ землетрясений. Из (25) следует, что значение S растёт с увеличением масштаба землетрясения. Следует подчеркнуть, что величина S представляет собой меру неопределённости оценки периода повторяемости землетрясений.

Совокупность последовательности появления каждого класса землетрясений позволяет определить основную закономерность сейсмических процессов. Значительные землетрясения перед и после пика (крупного события) сейсмической активизации повторяются аномально короткими промежутками времени (таблица 2). Например, 26.06.2016 г. проявился пик сейсмической активизации - произошло землетрясение с магнитудой около $Mw=7.16$. После наступил спад сейсмической активизации и произошли в 03.05.2017 г. и 05.05.2017 г. землетрясения с $Mw=6.5$ и 6.1 , соответственно. С 03.04.2018 г. по 27.10.2019 г. проявились шесть землетрясений с $Mw=5.5$. В 19.01.2020 г. произошло землетрясение с магнитудой около $Mw=6.5$ и вновь наступила сейсмическая активизация.

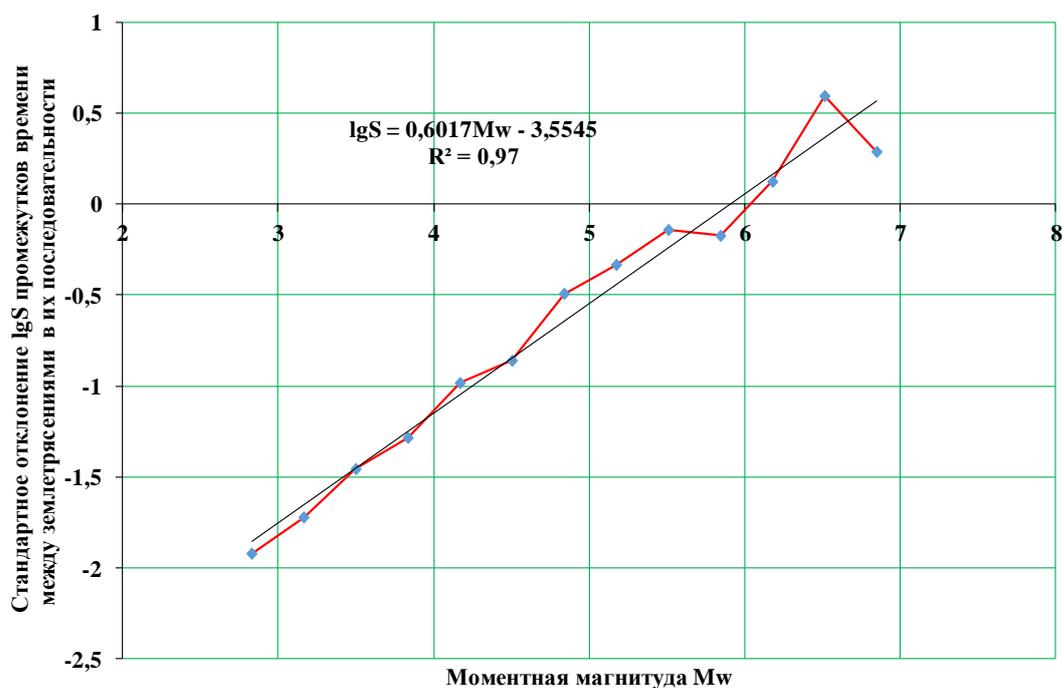


Рисунок 36. График функции стандартного отклонения S промежутков времени землетрясений от моментной магнитуды событий M_w .

Таблица 2. Синхронизация последовательности проявления классов значительных землетрясений с $M_w = 4.8 - 7.1$ Тянь-Шаня и прилегающих районов с января 2000 г. по февраль 2020 г.

	$M_w=4.83$	$M_w=5.16$	$M_w=5.50$	$M_w=5.83$	$M_w=6.16$	$M_w=6.50$	$M_w=6.83$	$M_w=7.16$
2000	08.08							
	08.15							
2001	09.02							
	09.06							
	10.19							
2002		05.30						
			09.15					
		11.01						
		12.15	12.25					
2003	01.05		02.24		02.25		02.24	
	03.09					03.12		
	03.18	03.15						
	03.24							
	03.30							
	03.30				05.04			
	05.10		05.16					
					05.22			
	09.03							
					09.26			
	12.01					12.01		

2004	01.16							
			03.27					
	05.19							
		11.17						
2005	01.16	01.19						
	02.08							
	02.15		02.15				02.14	
	03.12							
	04.06							
	10.08							
2006	03.22							
				07.06				
	03.30							
	11.08							
			12.24		12.25			
2007	01.24						01.08	
	01.31							
	02.02							
		04.15						
	06.06							
	07.25			07.21				
	07.31							
		10.09						
			12.26					
	12.31							
	12.31							
2008	04.10		06.01					
	10.06	10.05			10.05	10.05		10.05
	10.09							
		10.13		10.13				
		10.13						
	11.08							
	12.03							
2009		02.20						
			04.22	04.19				
	04.27		04.26					
	04.26							
	07.01							
	09.24							
2010	01.28		03.02					
	03.25							
	04.08							
	04.20	06.10						

	05.11							
	06.17							
	08.20							
	09.07			09.07				
	09.08							
	10.09							
		12.08						
2011	01.01							
			01.09					
	02.13							
	03.17							
			05.01					
	06.21							
					07.09			
			08.11					
	09.08							
2012	02.05							
	03.02		06.01		05.30			
			08.01					
			08.11					
2013							01.28	
	02.18							
	02.18							
		03.11		05.24				
		06.30						
	11.04							
			11.23					
		12.01						
	12.06							
2014								
		07.08						
		08.15						
				11.24				
2015		01.10						
					11.17			
	11.20							
		12.01						
			12.07					
2016	04.16							
	04.29							
	05.15							
	05.26						06.26	
	06.26		06.27					

	06.27							
	06.28			06.28				
	06.29							
	07.04							
	07.19							
	07.21							
		08.12						
	11.25	11.25	11.25					11.25
		11.25	11.25					
	11.26							
2017		03.14	05.03					
						05.03		
					05.05			
	05.16							
	05.22							
2018			04.03					
	04.11							
	05.06							
	09.03	09.03						
	10.30							
		11.03						
			12.20					
2019	01.06							
		01.12						
	04.29							
	08.12							
		10.27						
2020						01.19		
				01.24				
	02.15							

Заключение

1. Изучена динамика последовательности проявления каждого класса землетрясений с $M_w \pm \Delta M_w$ и отмечено, что промежутки времени между землетрясениями определённого класса неравные, изменчивые. При этом по методу Гутенберга – Рихтера определение средней годовой частоты землетрясений допускало, что промежутки времени между рассматриваемыми землетрясениями равные.

2. На основании изучения динамики последовательности проявления землетрясений отмечено, что повторяемость событий определяется иерархией сейсмических циклов. Период повторения событий выражается формулой:

$$\lg TD = 0.6973M_w - 4.0347, R^2 = 0.98,$$

где TD- средний период повторения (год), который определяется из неравных промежутков времени между землетрясениями, M_w - моментная магнитуда, R^2 –

достоверность аппроксимации. Оценка периода повторения землетрясений имеет неопределённость. Она большая у крупных землетрясений. Мерой неопределённости может быть стандартное отклонение S промежутков времени в последовательности определённого класса $M_w \pm \Delta M_w$:

$$\lg S = 0.6017 M_w - 3.5545, R^2 = 0.97.$$

Неопределённость периода повторения уменьшится слежением основных сейсмических циклов.

3. Приведена таблица синхронизации динамики последовательности ряда класса землетрясений с $M_w \pm \Delta M_w = 4.83 - 7.16$ на Тянь-Шане и в прилегающих районах за 2000-2019 гг. Слежение за динамикой последовательности проявления комплекса классов землетрясений позволит повысить точность и достоверность оценки повторяемости землетрясений и сейсмической опасности.

Литература

1. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Central Asia. Bishkek: Pim. 2004. -166 p.
2. 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: «Триада Принт». 2016. -116.
3. Мамбетова Г.А., Омуралиев М. Сейсмические циклы Тянь-Шаня на территории Кыргызстана и землетрясение Каркыра–Сарыджаз 28 января 2013 г. $K=15$. Вестник Института Сейсмологии НАН КР. -2019. -№1(13). -С.60-69.
4. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954.
5. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозу. – В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. с.121-150.
6. Kawasumi H. Proofs of 69 years' periodicity and immense of destructive earthquake in southern Kwanto district and problems in the countermeasures thereof. //Chigaku Zasshi. N76. с.115-138.
7. Shimazaki K. A model of earthquake recurrence and its application to crustal movement in Tokai district, Japan. Geographical Survey Institute, Tokyo, 1977, pp. 32-40.
8. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
9. Омуралиев М., Землянский А.А., Ачакеев Э. Управляющие параметры процессов в области подготовки сильных землетрясений Тянь-Шаня. //Материалы пятой международной конференции молодых учёных и студентов (Бишкек, 24-25 апреля 2013 г.) «Современные техника и технологии в научных исследованиях», Москва-Бишкек: ИС РАН, 2013, с.103-109.
10. Омуралиев М., Омуралиева А. Естественная размерность сейсмических процессов и сейсмической среды на примере Тянь-Шаня. // Вестник ИС НАН КР, 2015, №6, С. 96-107.
11. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М: Изд. Иностран. литер.1963, -670 с.
12. Mogi K. Seismic activity and earthquake prediction/Seismological Society of Japan, Tokyo, 1977, pp. 203-14.
13. Kanamori H. The energy release in great earthquakes. J. Geophys. Res., 1977. 82. 2981-7.

Рецензент: д. г- м. наук, профессор Абдрахматов К.Е.