

УДК 550.34

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

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

Аннотация. В статье изложены результаты анализа динамических параметров очагов землетрясений ($K_R \geq 7.6$) Тянь-Шаня: f_0 -угловой частоты спектра поперечной волны; AD - средней подвижки по разломам очага; $\Delta\sigma$ - сброшенного напряжения; μ - жёсткости - модуля сдвига, M_0 - сейсмического момента, M_w - моментной магнитуды на основе каталога динамических параметров Института сейсмологии НАН КР 2012-2013 гг. по данным сетей цифровых сейсмических станций KRNET (ИС НАН КР), KNET (ИС РАН) и других соседних стран.

Ключевые слова: землетрясение, очаг, динамический параметр, угловая частота, подвижка, сейсмический момент, моментная магнитуда.

ТЯНЬ-ШАНЬ ЖЕР ТИТИРӨӨ БУЛАКТАРЫНЫН ДИНАМИКАЛЫК ПАРАМЕТРЛЕРИНИН АНАЛИЗИ

Кыскача мазмуну. Макалада КР УИАнын Сейсмология институтунун динамикалык параметрлер каталогунун негизинде KRNET, KNET жана башка коңшу мамлекеттердин санариптик сейсмикалык станцияларынын тармактары боюнча 2012-2013-жылдардагы Тянь-Шан жер титирөө очокторунун ($K_R \geq 7.6$) динамикалык параметрлеринин (f_0 - туурасынан кеткен (жылышуу) толкун спектринин бурчтук жыштыгы, AD – очоктун жаракалары боюнча орточо жылышуу, $\Delta\sigma$ – түшкөн чыңалуу, μ - катуулук - кысылуу модулу, M_0 - сейсмикалык момент, M_w – моменттик магнитуда) анализинин жыйынтыктары берилген.

Негизги сөздөр: жер титирөө, очок, динамикалык параметр, бурчтук жыштык, жылышуу, түшкөн чыңалуу, катуулук, сейсмикалык момент, моменттик магнитуда.

ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF THE TIEN SHAN EARTHQUAKES' FOCI

Abstract. Analysis results of the dynamic parameters of earthquakes' foci ($K_R \geq 7.6$) in the Tien Shan are given in the paper, they are: f_0 - angular frequency of the shear wave spectrum, AD - average displacement along the faults of the focus, $\Delta\sigma$ – stress drop, μ - rigidity - shear modulus, M_0 - seismic moment, M_w - moment magnitude, based on the catalogue of dynamic parameters of the Institute of Seismology NAS KR for 2012-2013 according to digital seismic stations' networks KRNET (IS NAS KR), KNET (RS RAS) and other neighboring countries.

Keywords: earthquake, focus, dynamic parameter, angular frequency, displacement, stress drop, rigidity, seismic moment, moment magnitude.

Изучение динамических параметров землетрясений очагов землетрясений по данным сетей цифровых сейсмических станций является актуальной проблемой сейсмологии для решения фундаментальных теоретических и практических задач. Динамические параметры очагов землетрясений Тянь-Шаня определяются в ИС НАН КР по данным цифровых сейсмических станций сетей KNET (ИС РАН) и KRNET (ИС НАН КР) на основе апробированной методики [1, 2] на площади с координатами $\varphi=39.00^\circ-44.0^\circ$, $\lambda=69.00^\circ-81.00^\circ$.

В качестве динамических параметров очагов землетрясений приняты: угловая частота спектра – f_0 ; спектральная плотность – Ω_0 ; сейсмический момент – M_0 ; размеры разрыва (радиус Брюна) – R ; сброшенное напряжение – $\Delta\sigma$; средняя подвижка по разрыву – AD ; сейсмическая энергия упругих сейсмических волн (в предположении, что взаимодействие берегов разрыва определяется законом сухого трения) – E ; моментная магнитуда – M_w .

Значение f_0 и Ω_0 снимаются с графика спектра S-волны. Сейсмический момент вычисляется по формуле:

$$M_0 = \frac{4 \sqrt{2\pi\rho V_s^3 \Omega_0}}{R_\psi G S_m S_k} \quad (1),$$

где: $\rho=2,7\text{г/см}^3$ – плотность пород в области очага;

V_s – скорость распространения S- волны;

Ω_0 – спектральная плотность спектра Фурье записи поперечной волны;

$R_\psi = 0.64$ – влияние направленности излучения очага;

$G=1/r$ – геометрическое расхождение, $r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$, где

r – гипоцентрального расстояние;

Δ – эпицентрального расстояние;

h – глубина очага;

$S_m=1$ – поглощение амплитуды за счёт добротности среды;

S_k – влияние эффекта увеличения амплитуды колебания при выходе на дневную поверхность.

Длина отрезка записи для построения спектра выбирается от момента вступления S волны до момента спада амплитуды до 1/3 максимальной амплитуды. Уровень полезного сигнала выбранной записи должен превышать фон микросейсм в 3 раза [3].

Спектры сейсмических волн и динамические параметры очагов землетрясений Тянь-Шаня изучаются по данным цифровых широкополосных станций сети с 1991 г. [4, 5, 6, 7]. Определялись спектры смещений, скорости, ускорения по трём компонентам. Детальное изучение спектров сейсмических волн очагов показало, что спектры не сплошные, а дискретные: выделяется множество (система) частот, из них одна или две могут быть приняты как угловые частоты. Множество частот на дискретных спектрах выражают систему разрывов в очаге землетрясения с характерными дифференцированными сейсмическими моментами M_0 , жёсткостями μ , сброшенными напряжениями $\Delta\sigma$, амплитудами подвижки D . Наряду с тем, большое внимание обращено на то, что в пределах угловой частоты спектра ускорений сейсмических волн имеется большая спектральная плотность. Этот фактор играет большое значение в сейсмостойком строительстве.

Отмечена [5] связь сейсмического момента (M_0), угловой частоты продольной волны (f_0) и сброшенного напряжения ($\Delta\sigma$) малых землетрясений в пределах разлома Ататсугава Центральной Японии [8], которая выражается эмпирической формулой:

$$\lg M_0 = -(2.95960.027) \lg f_0 + 1.095 \lg \Delta\sigma + 21.488. \quad (2)$$

Связь сейсмического момента (M_0), угловой частоты (f_0), и сброса напряжений ($\Delta\sigma$) землетрясений Южной Калифорнии [9] выражается эмпирической формулой:

$$\lg M_0 = -(2.9660.03) \lg f_0 + 1.381 \lg \Delta\sigma + 20.98. \quad (3)$$

Определено соотношение моментной магнитуды $M_w(\Delta\sigma)$, сброшенного напряжения ($\Delta\sigma$), сейсмического момента (M_0) ряда сильных землетрясений Мира [10]:

$$M_w(\Delta\sigma) = 0.578 \lg M_0 + 0.004 \lg \Delta\sigma - 8.35, \quad (4)$$

где M_w – моментная магнитуда, M_0 – сейсмический момент (дин·см), $\Delta\sigma$ – сброс напряжений (бар). Следует отметить, что Канамори [11] выразил моментную магнитуду для сильных землетрясений ($\Delta\sigma \approx 30$ бар) по формуле:

$$M_w = (\lg M_0 / 1.5) - 10.7. \quad (5)$$

В каталоге ИС НАН КР моментная магнитуда определялась именно по формуле (5).

Исходные данные и методика исследования

В качестве исходного материала использовался каталог динамических параметров очагов ряда землетрясений с $K_R \geq 7.6$ за 01.2012-01.2013 гг. (в связи с землетрясением Каркыра- Сарыжаз, $K_R = 15.1$, 28.01.2013 г.) Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики по данным сетей цифровых станций KNET (ИС РАН) и KRNET (ИС НАН КР) на площади с координатами $\varphi=39^\circ-44^\circ$, $\lambda=69^\circ-81^\circ$ (рисунок 1).

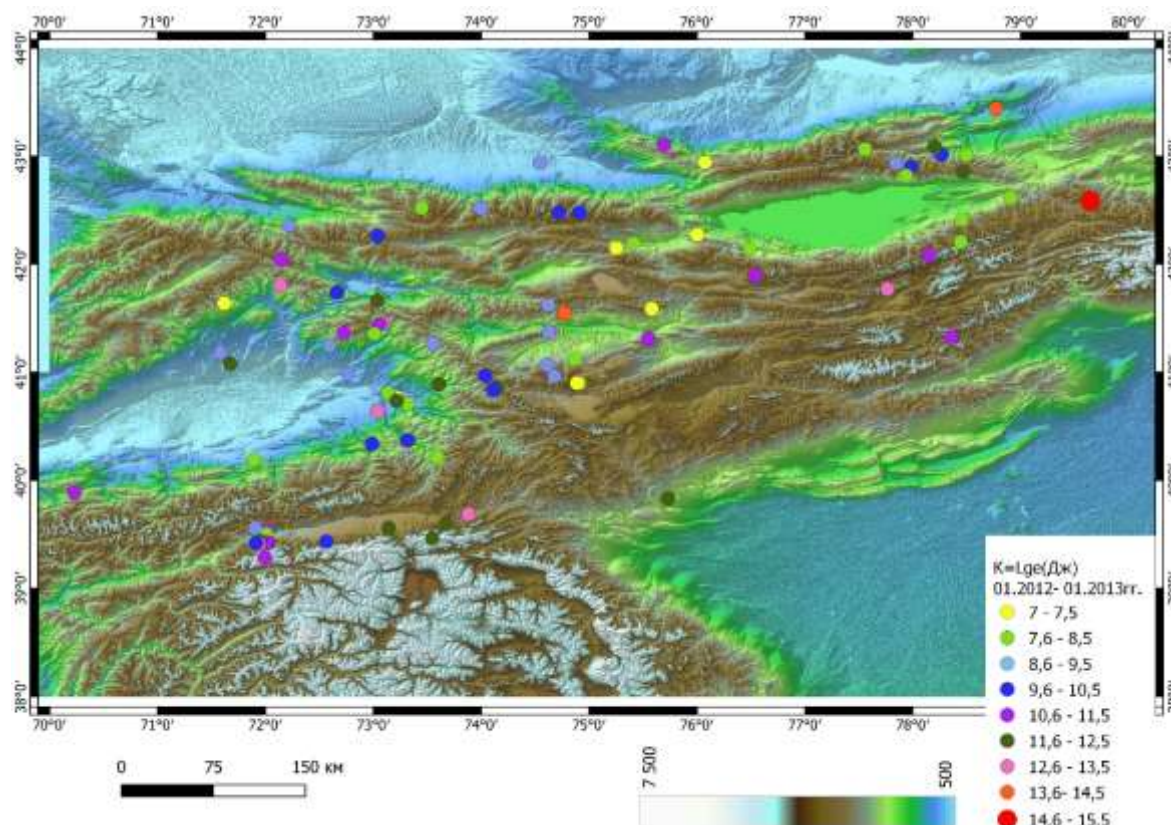


Рисунок 1. Карта-схема эпицентров землетрясений Тянь-Шаня, для которых определены динамические параметры очагов землетрясений за 01.2012 г.- 01.2013 г. по данным цифровых станций сетей KNET (ИС РАН), KRNET (ИС НАН КР). Кружочками обозначены энергетические классы: $K_R = 7.0-7.5$ – жёлтые, 7.6-8.5- зелёные, 8.6-9.5- голубые, 9.6-10.5- синие, 10.6-11.5- фиолетовые, 11.6-12.5- темно-зелёные, 12.6-13.5- малиновые, 13.6-14.5- оранжевые, 14.6-15.5- красные.

При исследовании важно было осуществлять анализ динамических параметров очагов землетрясений в пространстве и во времени. В качестве примера рассмотрим распределение времени проявления и места землетрясений, для которых определены динамические параметры (рисунок 2). Выделяются районы раннего (порядка девяти) и позднего (около семи) проявления очагов, которые составляют своего рода «сейсмический хаос». Районы раннего проявления очагов - «центробежного» характера отмечались в западной части активного поднятия Терской, в восточной части поднятия Кунгей, в пределах поднятия Кыргызтоо, в восточной части поднятия Молдотоо, в западных и восточных частях поднятия Алай [12]. Районы позднего проявления – своеобразные «центростремительные схождения» очагов землетрясений выделялись в западной части поднятия Заалай, в пределах юго-восточного сегмента Таласо-Ферганского разлома, западной части поднятия Кунгей, в пределах поднятий Нура, Нарынтоо и восточной части поднятия Терской. В последнем 28.01.2013 г. произошло землетрясение Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$).

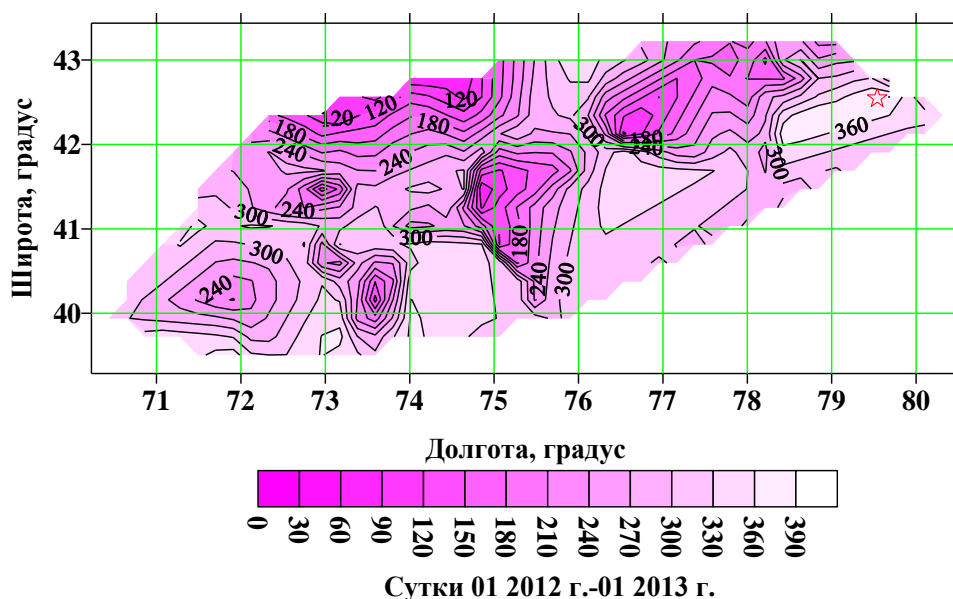


Рисунок 2. Распределение времени проявления очагов землетрясений на Тянь-Шане за 01.2012 г.- 01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$, 28.01.2013 г.).

В последовательности проявления очагов землетрясений с $K_R \geq 7.6$ за 01.2012 г.- 01.2013 г. выделяется нелинейными полиномами иерархия сейсмических циклов (рисунок 3). Следует отметить, что порядок циклов условный, который может изменяться в зависимости от длительности изученной сейсмичности за год или за несколько лет. Каждый цикл состоит из фаз: сейсмической активизации, пика сейсмической активизации, спада сейсмической активизации и затишья. Сейсмическая активизация и сейсмический спад имеют определённые градиенты – скорости подъёма и спуска. Периоды повторения циклов здесь, например, второго порядка составляют порядка 109 и 234 суток. Цикл первого порядка представлен фазой сейсмической активизации.

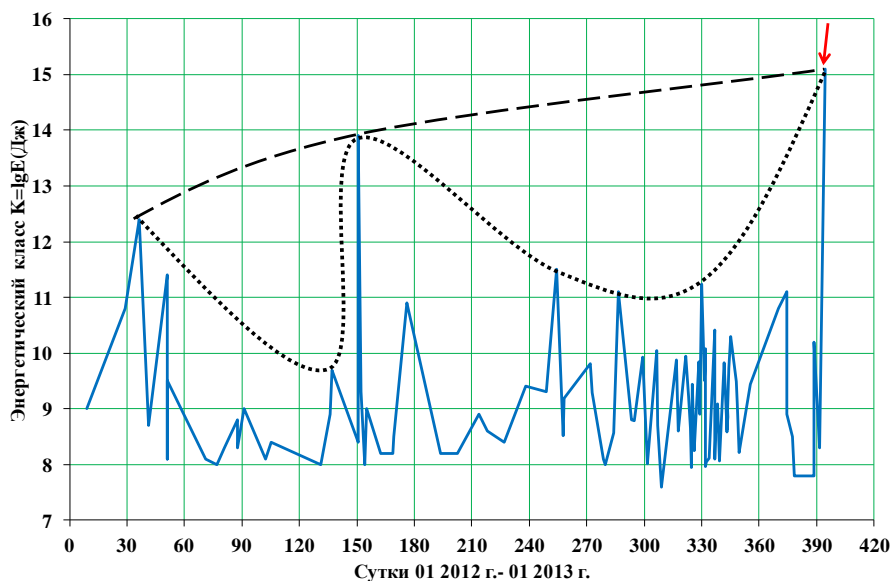


Рисунок 3. График последовательности проявления выделенных землетрясений с $K_R \geq 7.6$ Тянь-Шаня за 01.2012 г. – 01.2013 г. Сейсмические циклы второго порядка обозначены точечными линиями, цикл первого порядка – пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра –Сарыжаз ($K_R = 15.1$, 28 января 2013 г.).

Одним из важных динамических параметров в очагах землетрясений является *подвижка по разломам*, которая определяется по формуле Брюна [1]. На рисунке 4 показано распределение средней подвижки AD в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.-01.2013 г. Фоновые значения AD находятся в пределах 5-10 см. Большие значения $AD \geq 20$ см проявились на отдельных сегментах активных разломов. В частности, в восточном сегменте Предтерекской разлома.

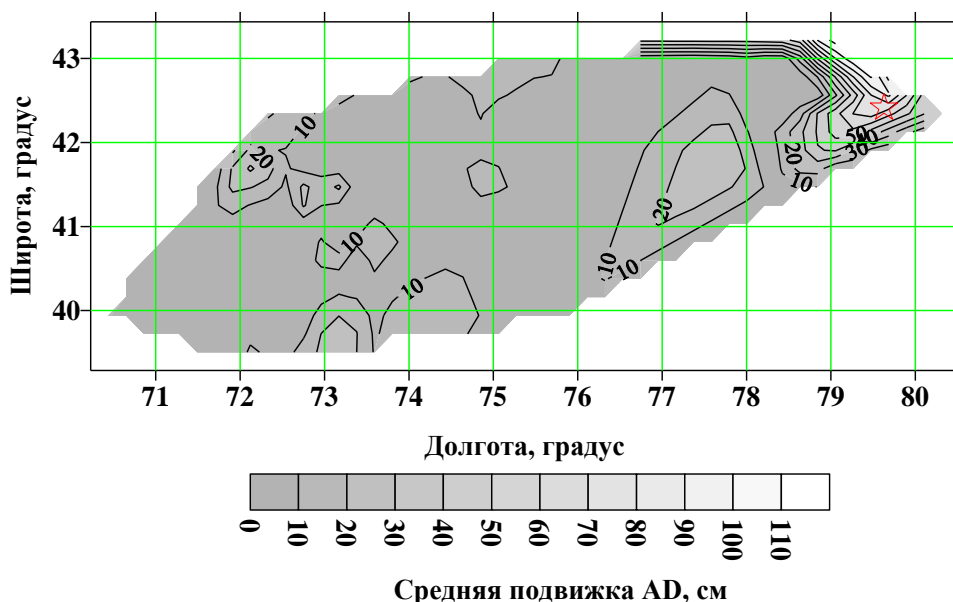


Рисунок 4. Распределение средней подвижки (AD, см) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.- 01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $AD = 97$ см, 28.01.2013 г.).

На графике изменения средней подвижки AD в очагах во времени за 01.2012 г.- 01.2013 г. выделяется своеобразная иерархия динамических циклов. Каждый цикл состоит из периодов (фаз) повышения, спада и проявления малых значений динамического параметра очагов землетрясений (рисунок 5). Период повторения циклов третьего порядка составляет 64-102 суток, циклов второго порядка – 140-203 суток. Полупериод цикла первого порядка - около 240 суток. Перед проявлением сильного землетрясения Каркыра-Сарыджаз ($K_R = 15.1$, $AD = 0.9$ см, 28 января 2013 г.) отмечалась активизация процессов образования подвижек в циклах третьего, второго и первого порядков. Как видно из графика, вероятное время ожидания данного землетрясения по этим циклам составляет около 140, 64 и 30 суток по циклам первого, второго и третьего порядков, соответственно.

На рисунке 6 показана суммарная подвижка в очагах землетрясений Тянь-Шаня с 01.2012 г. по 01.2013 г. График её неровный, ступенчатый, что выражает циклы подвижек в последовательности очагов землетрясений. Тренд этого графика выражается полиномом третьей степени:

$$D_{\text{кум}} = 2244.6x^3 - 1E+07x^2 + 3E+10x - 2E+13, R^2 = 0.98, \quad (6)$$

где $D_{\text{кум}}$ - кумулятивная подвижка в очагах землетрясений, x - годы, R^2 - достоверность аппроксимации. Резкое накопление подвижек отмечалось с 2012,88 года (19.11.2012 г.) и продолжалось до главного толчка землетрясения 28.01.2013 г. Эмпирическая формула суммарной подвижки означает, что накопление подвижки в очагах землетрясений Тянь-Шаня имеет нелинейный фрактальный характер.

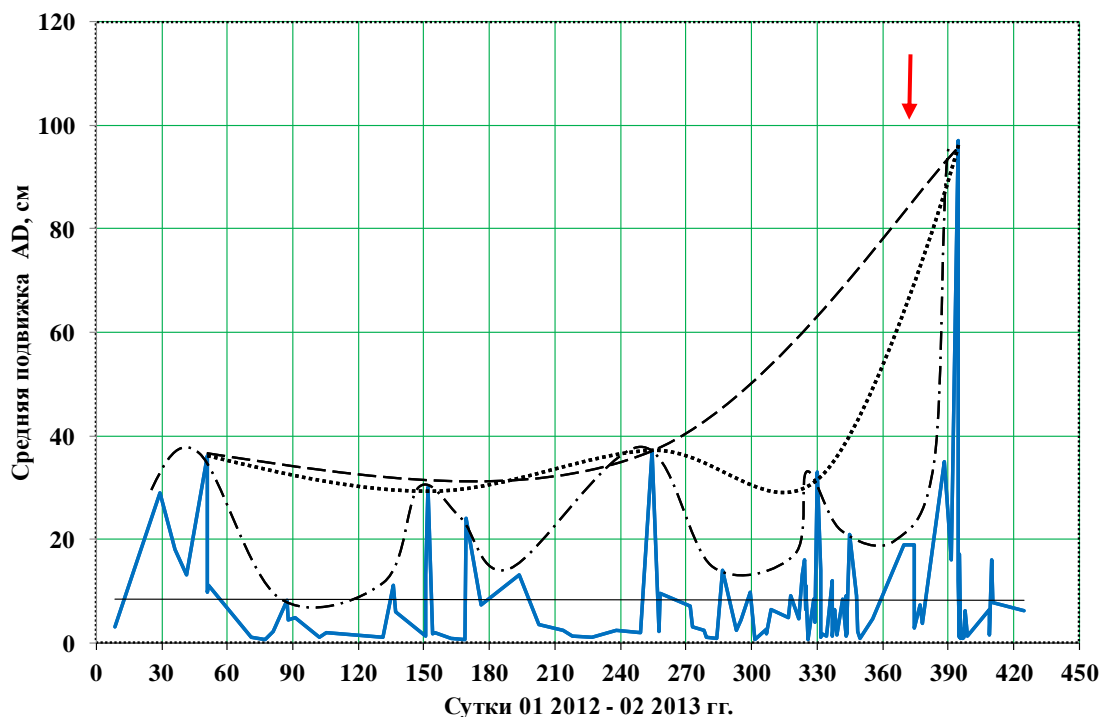


Рисунок 5. График изменения средней подвижки AD в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 2012-2013 гг. Циклы подвижек в очагах третьего порядка обозначены пунктирными линиями с точками, циклы второго порядка - точечными линиями, цикл первого порядка - пунктирными линиями. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра -Сарыжаз ($K_R=15.1$, $AD=0.97$ м, 28.01.2013 г.).

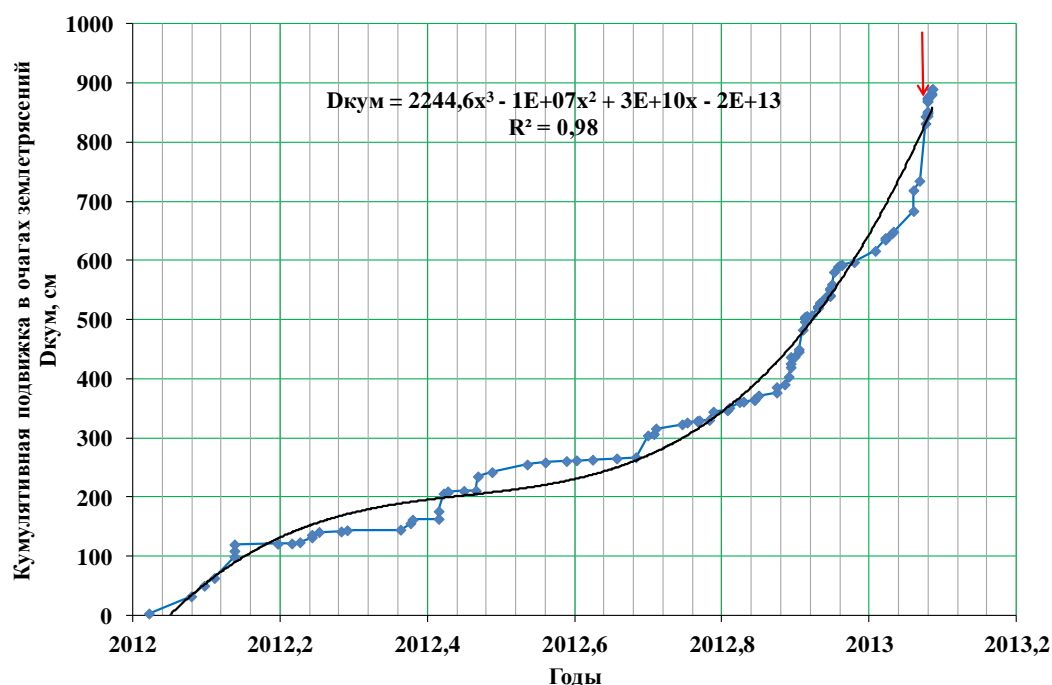


Рисунок 6. Кумулятивная подвижка ($D_{кум}$) в очагах землетрясений с энергетическими классами $K_R \geq 7.6$ в Тянь-Шане за 2012-2013 гг. Сплошной чёрной линией обозначен тренд. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра -Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $D = 0.97$ м, 28 января 2013 г.).

Следующим главным динамическим параметром очага землетрясений является *сброс напряжения* $\Delta\sigma$, которая определяется по формуле Брюна [1]. Распределение сброса напряжений ($\lg\Delta\sigma$, МПа) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.-01.2013 г. приведено на рисунке 7. Относительно большие значения $\Delta\sigma \geq 10$ МПа отмечались в отдельных сегментах Таласо-Ферганского разлома и Кыргызского, Кунгейского, Терской активные поднятий.

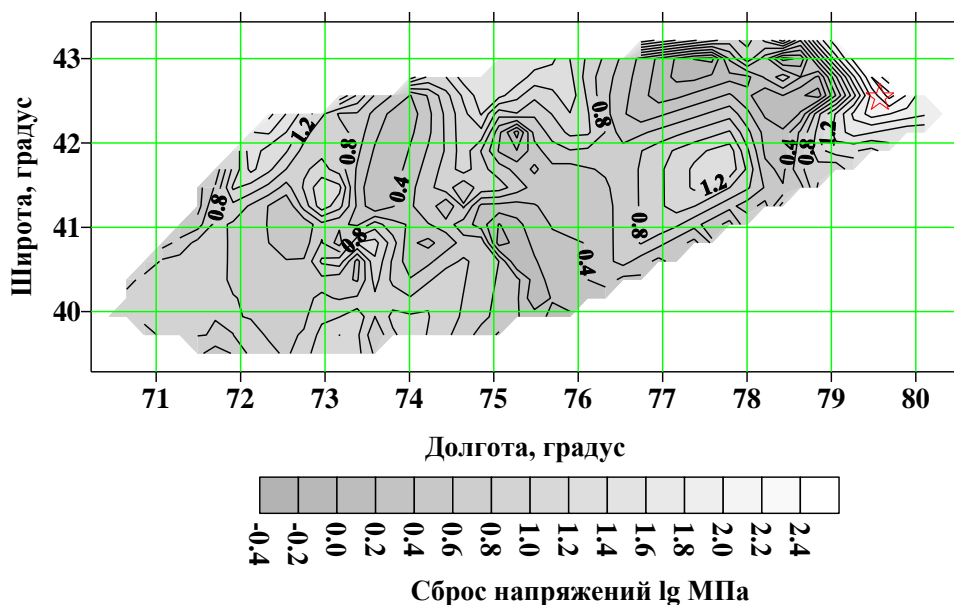


Рисунок 7. Распределение сброса напряжений ($\lg\Delta\sigma$, МПа) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R=15.1$, $\Delta\sigma=350$ МПа, 28.01.2013 г.).

На графике изменения сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ (МПа) в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. отмечались своеобразные динамические циклы (рисунок 8). Периоды повторения циклов, например, второго порядка составляли около 99 и 243 суток, соответственно.

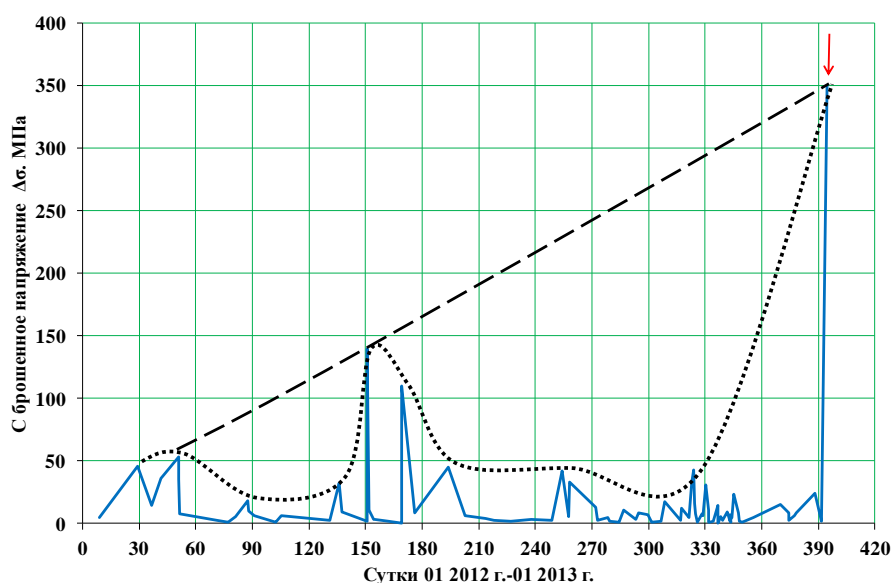


Рисунок 8. График изменения сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ (МПа) в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. Циклы второго порядка

обозначены точечными линиями, цикл первого порядка – пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра–Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $\Delta\sigma = 350$ МПа, 28 января 2013 г.).

На рисунке 9 показано изменение кумулятивного сброшенного напряжения (Кум $\Delta\sigma$) в очагах землетрясений с энергетическими классами $K_R \geq 7.6$ в Тянь-Шане за 01.2012 г.- 01.2013 г. График его неровный, что отражает циклический характер изменения сброшенного напряжения в последовательности очагов землетрясений. Тренд этого графика выражается полиномом третьей степени:

$$\text{Кум } \Delta\sigma = 6E-05x^3 - 0.0305x^2 + 7.0866x - 151.94, R^2 = 0.96, \quad (7)$$

где Кум $\Delta\sigma$ - кумулятивное сброшенное напряжение в очагах землетрясений, x - годы, R^2 - достоверность аппроксимации. Перед главным толчком землетрясения Каркыра – Сарыжаз Кум $\Delta\sigma = 1150$ МПа.

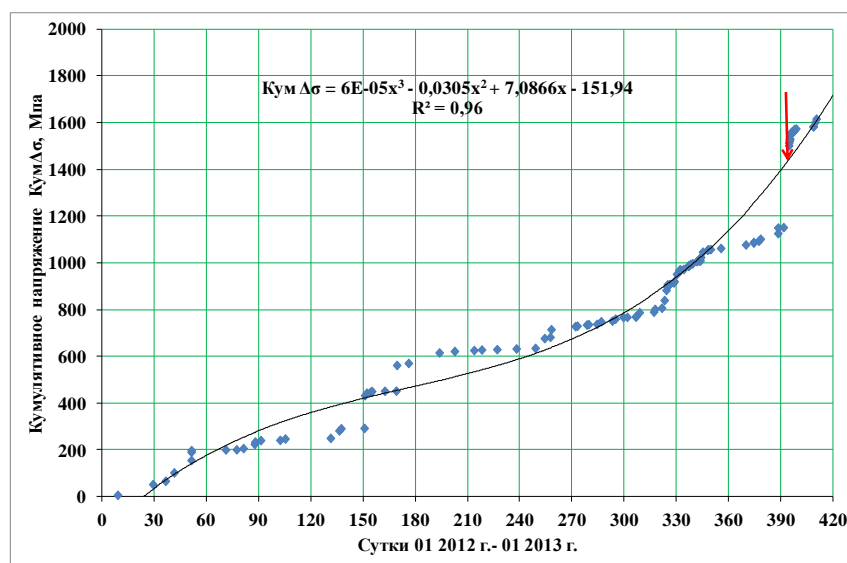


Рисунок 9. Кумулятивное сброшенное напряжение (Кум $\Delta\sigma$) в очагах землетрясений с энергетическими классами $K_R \geq 7.6$ в Тянь-Шане за 01.2012-01.2013 гг. Сплошной чёрной линией обозначен тренд, красной стрелкой - землетрясение Каркыра –Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $\Delta\sigma = 350$ МПа, 28 января 2013 г.).

В очаге землетрясения фундаментальным динамическим параметром представляется *модуль сдвига*, который определяется с использованием формулы [10, 13]:

$$\frac{E}{M_0} = \frac{\sigma}{2\mu}, \quad (8)$$

из (8)

$$\mu = \frac{(M_0/E \cdot \Delta\sigma)}{2}. \quad (9)$$

Распределение жёсткости - модуля сдвига μ (10^{11} , дин/см²) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 г. приведено на рисунке 10. Относительно большие значения $\mu \geq 3.5 \times 10^{11}$, дин/см² отмечались на северо-западном сегменте Таласо-Ферганского разлома, в пределах активных поднятий впадины Сонкёл и в восточной части впадины Исык-Куль. Фоновое значение жёсткости составляло $< 3.0 \times 10^{11}$, дин/см².

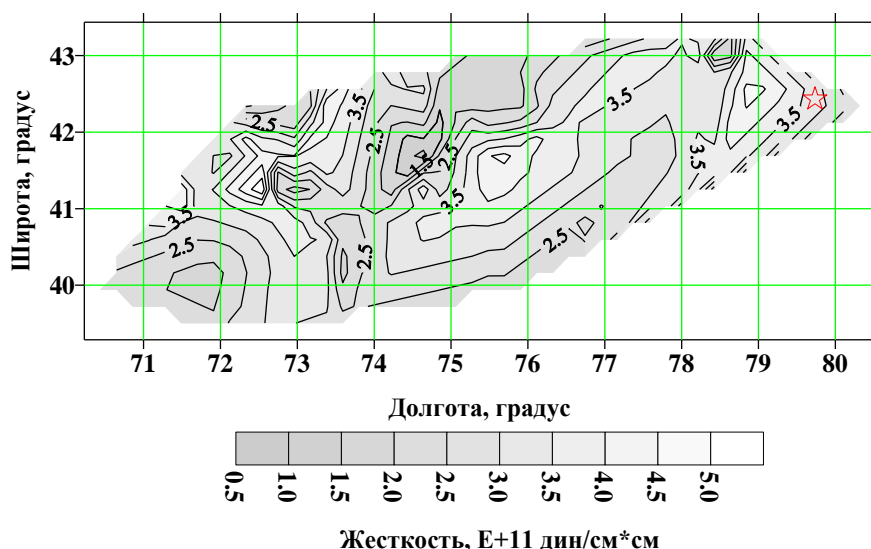


Рисунок 10. Распределение жёсткости μ (10^{11} , дин/см²) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.- 01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $\mu = 1.75 \times 10^{11}$ дин/см², 28 01 2013 г.).

На графике изменения жёсткости μ (10^{11} , дин/см²) в последовательности очагов землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. выделяются динамические циклы (рисунок 11). Периоды повторения циклов, например, второго порядка составляет 50-87 суток. На шести пиках этих циклов значения жёсткости составляли: 4.4, 5.0, 5.6, 5.7, 5.3, 5.0 $\times 10^{11}$ дин/см², соответственно. Интересно отметить, что перед главным толчком землетрясения Каркыра-Сарыжаз наблюдались фазы спадов динамических циклов жёсткости очагов первого и второго порядков.

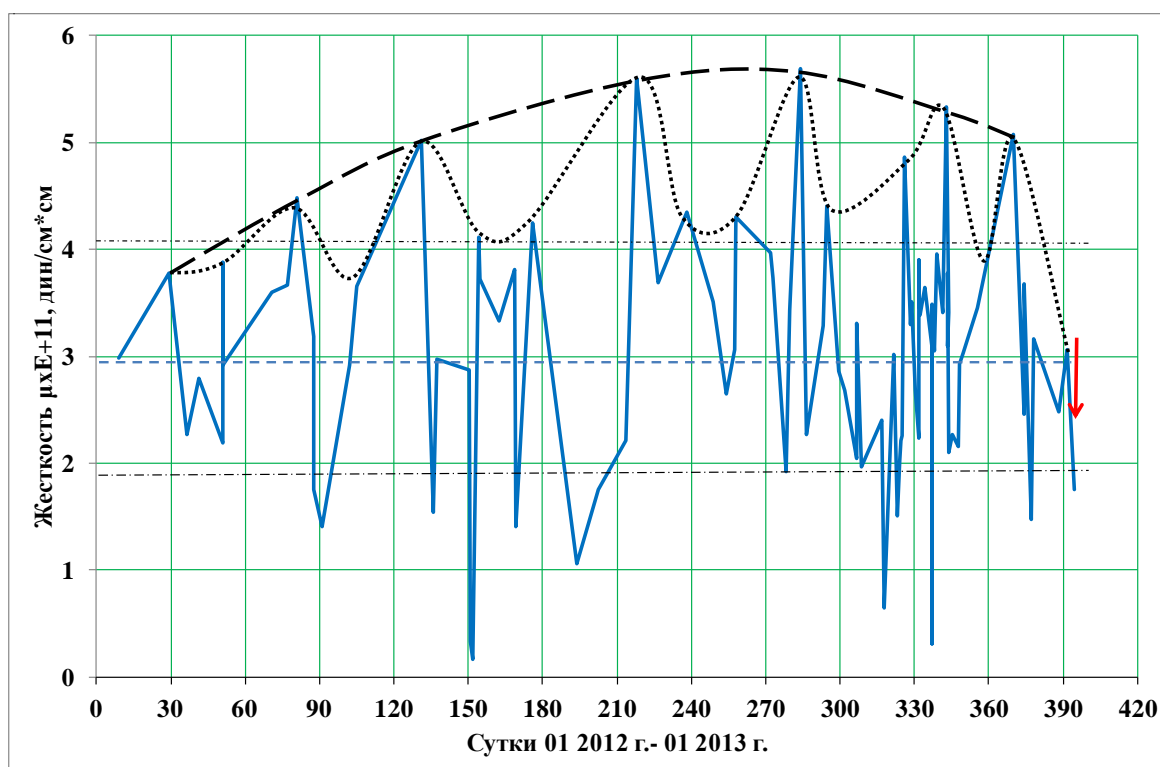


Рисунок 11. График изменения жёсткости μ (10^{11} , дин/см²) в последовательности очагов землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. Циклы второго порядка

обозначены точечными линиями, цикл первого порядка – пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра –Сарыжаз ($K_R=15.1$, жёсткость $\mu=1.75 \times 10^{11}$ дин/см², 28 января 2013 г.). Среднее значение $C=2.99 \times 10^{11}$ дин/см² обозначено пунктирной горизонтальной линией. Значение $C+S=4.1 \times 10^{11}$ дин/см² –обозначено горизонтальным пунктиром с точками. Стандартное отклонение $S=1.22 \times 10^{11}$ дин/см².

На рисунке 12 показана суммарная жёсткость (Кум μ , дин/см²) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.-01.2013 г. График её неровный, что выражает динамические циклы. Он выражается полиномом третьей степени:

$$\text{Кум } \mu = 810^{-6}x^3 - 0.0032x^2 + 0.7617x - 11.338, \quad R^2 = 0.98, \quad (10)$$

где Кум μ - кумулятивная жёсткость в очагах землетрясений, x - годы, R^2 - достоверность аппроксимации. Перед главным толчком землетрясения Каркыра –Сарыжаз суммарная величина жёсткости составляла Кум $\mu = 270$ дин/см².

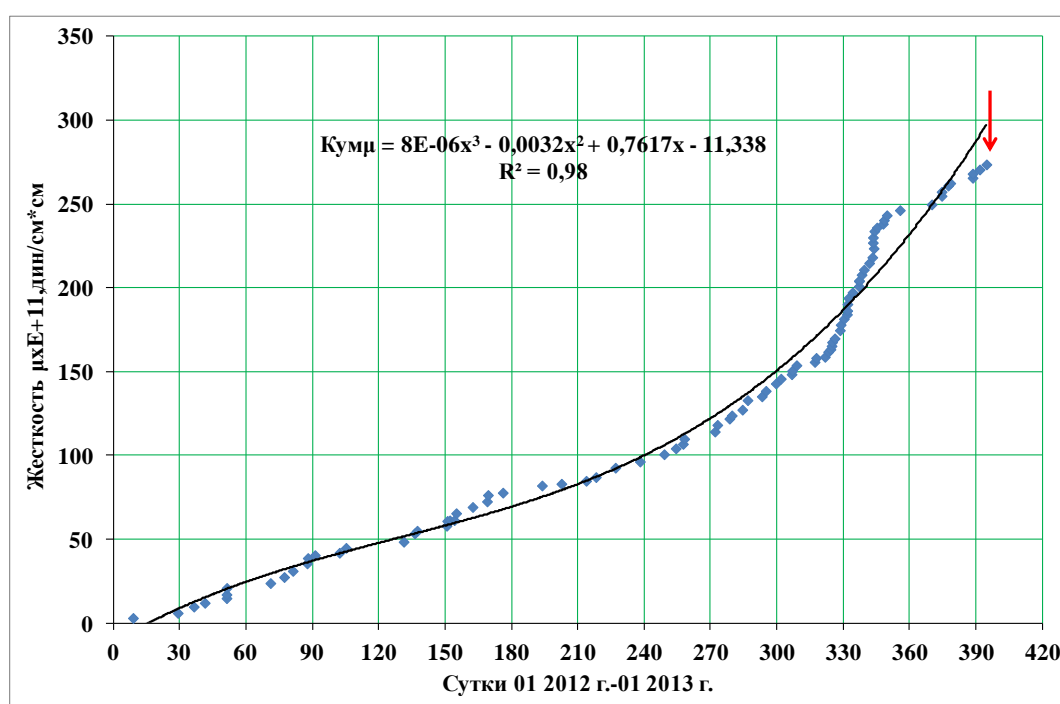


Рисунок 12. Кумулятивная жёсткость (Кум μ) в очагах землетрясений в Тянь-Шане за 01.2012-01.2013 гг. Сплошной чёрной линией обозначен тренд, красной стрелкой - землетрясение Каркыра –Сарыжаз ($K_R=15.1$, жёсткость $\mu = 1.75 \times 10^{11}$ дин/см², 28 января 2013 г.).

Сейсмический момент M_0 очага землетрясений является интегральным динамическим параметром, предопределяющим магнитуду землетрясения. На рисунке 13 приведено распределение сейсмического момента $\lg M_0$ (дин·см) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.- 01.2013 г. Фоновое значение составляет $\lg M_0 = 21-22$ (дин·см). Относительно высокие значения $\lg M_0 \geq 22.8$ отмечались в восточной части поднятия Заалай, в пределах поднятий Нура, Нарынтоо и в восточной части поднятия Терскей.

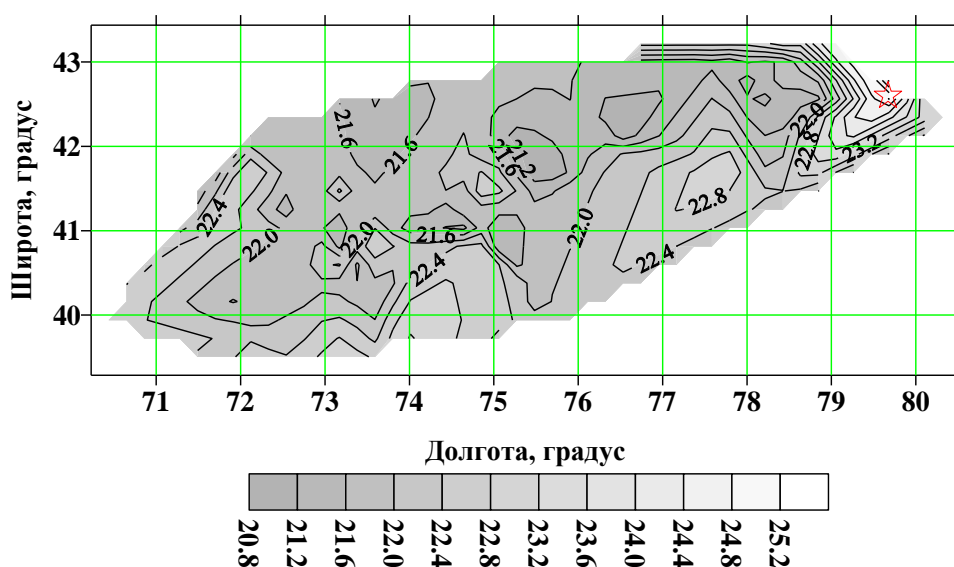


Рисунок 13. Распределение сейсмического момента $\lg M_0$ (дин·см) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $M_0 = 2.7 \times 10^{25}$ дин·см, 28.01.2013 г.).

На рисунке 14 приведён график изменения сейсмического момента M_0 (Нм) в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012 г.- 01.2013 г., где выделяется иерархия динамических циклов. Периоды циклов, в частности, второго порядка составляют около 120 и 234 суток

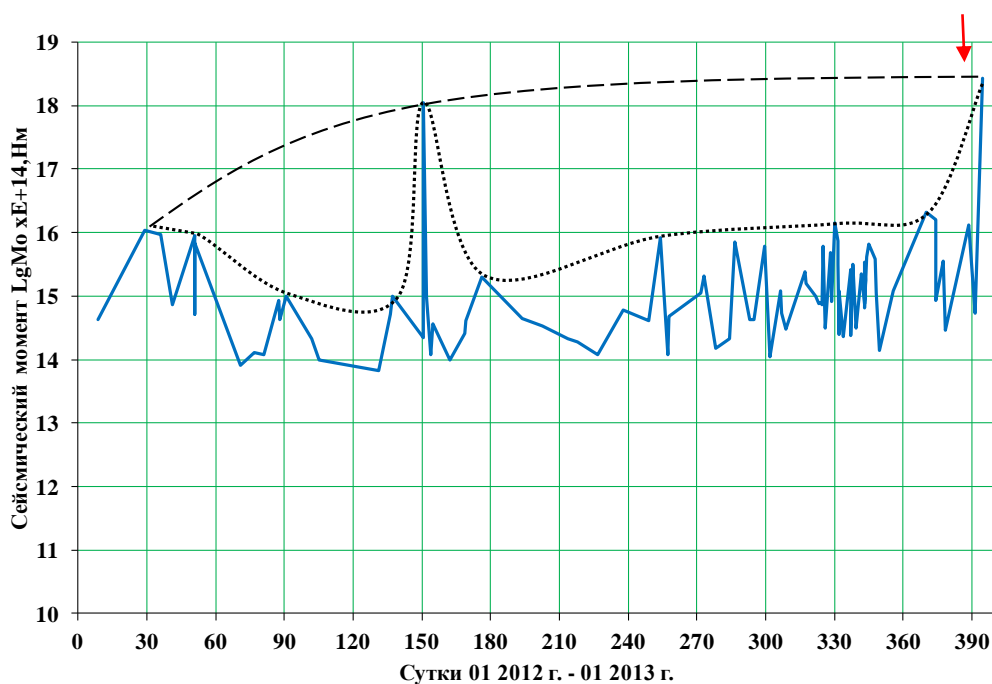


Рисунок 14. График изменения сейсмического момента M_0 (Нм) в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. Циклы второго порядка обозначены точечными линиями, цикл первого порядка – пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра –Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $M_0 = 2.7 \times 10^{18}$ Нм, 28 января 2013 г.).

Суммарный сейсмический момент КумМо (Нм) в очагах землетрясений Тянь-Шаня с 01.2012 г. до главного толчка 25.01.2013 г. показан на рисунке 15. График его имеет линейный тренд и выражается эмпирической формулой:

$$\text{Кум Мо} = (0.0389x - 0.2193) \times 10^{17}, \text{ Нм.} \quad (11)$$

На этом графике КумМо отмечаются верхний и нижний пределы флуктуации. Амплитуда флуктуации составляет около $11 \cdot 10^{17}$ Нм, т.е. вероятная величина Мо ожидаемого землетрясения должна была быть $\text{Мо} > 1.1 \cdot 10^{18}$ Нм. На самом же деле сейсмический момент землетрясения Каркыра-Сарыжаз 28.01.2013 г. составлял $\text{Мо} = 2.7 \cdot 10^{18}$ Нм.

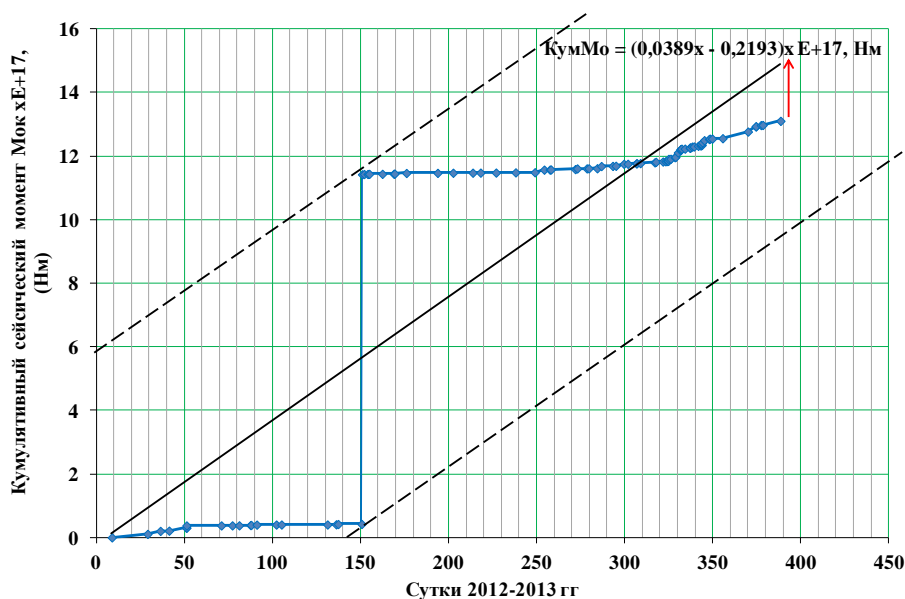


Рисунок 15. Кумулятивный сейсмический момент (КумМо) в очагах землетрясений с энергетическими классами $K_R \geq 7.6$ в Тянь-Шане за 01.01.2012-25.01.2013 гг. Сплошной чёрной линией обозначен тренд, пунктирными линиями – нижний и верхний пределы флуктуации, красной стрелкой - землетрясение Каркыра – Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $\text{Мо} = 2.7 \times 10^{18}$ Нм, 28 января 2013 г.).

Следует подчеркнуть, что все основные динамические параметры очагов землетрясений определяются **угловыми частотами на спектрах сейсмических волн** этих источников. Распределение угловой частоты (f_0 , Гц) на спектрах сейсмических поперечных волн в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.-01.2013 г. имеет свои особенности (рисунок 16). Выделяются районы с относительно высокими угловыми частотами ($f_0 \geq 4$ Гц) в западной части поднятия Терской, восточной части поднятия Кыргызтоо, в пределах поднятия Талас и низкими угловыми частотами ($f_0 < 2$ Гц) в пределах Заалайского, Кокшаальского поднятий, в восточной части поднятия Терской. В последнем угловые частоты опускались до минимума $f_0 < 1.5$ Гц, где и проявился очаг землетрясения Каркыра-Сарыжаз $f_0 = 0.8$ Гц.

Результаты анализа угловой частоты в последовательности очагов землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г.- 01.2013 г. приведены на рисунке 17. Отмечена иерархия динамических циклов второго и первого порядков. Периоды циклов, например, второго порядка составляли 46-88 суток.

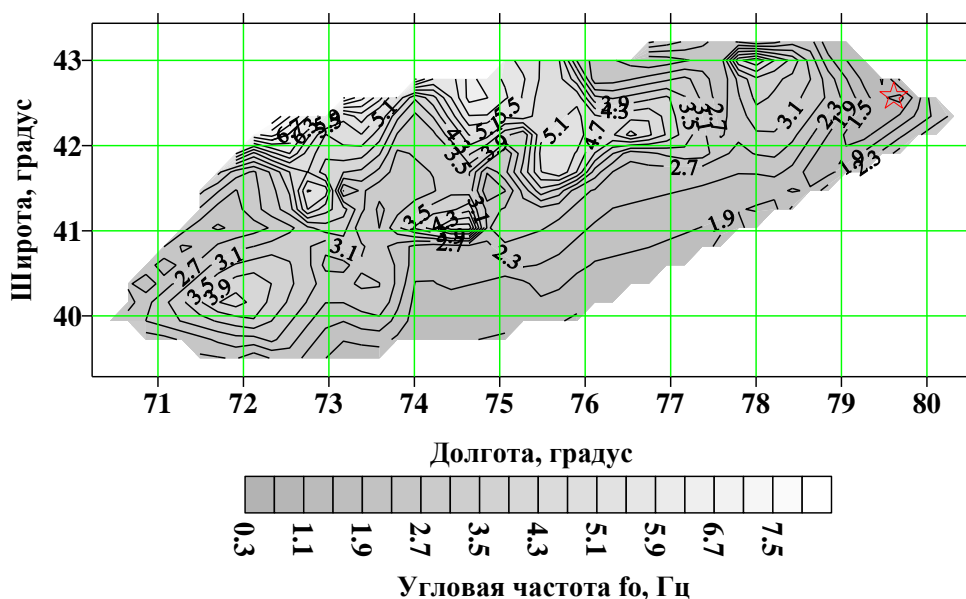


Рисунок 16. Распределение угловой частоты (Гц) на спектрах сейсмических поперечных волн в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012- 01.2013 г. Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R=15.1$, $f_0=0.8$ Гц, 28.01.2013 г.).

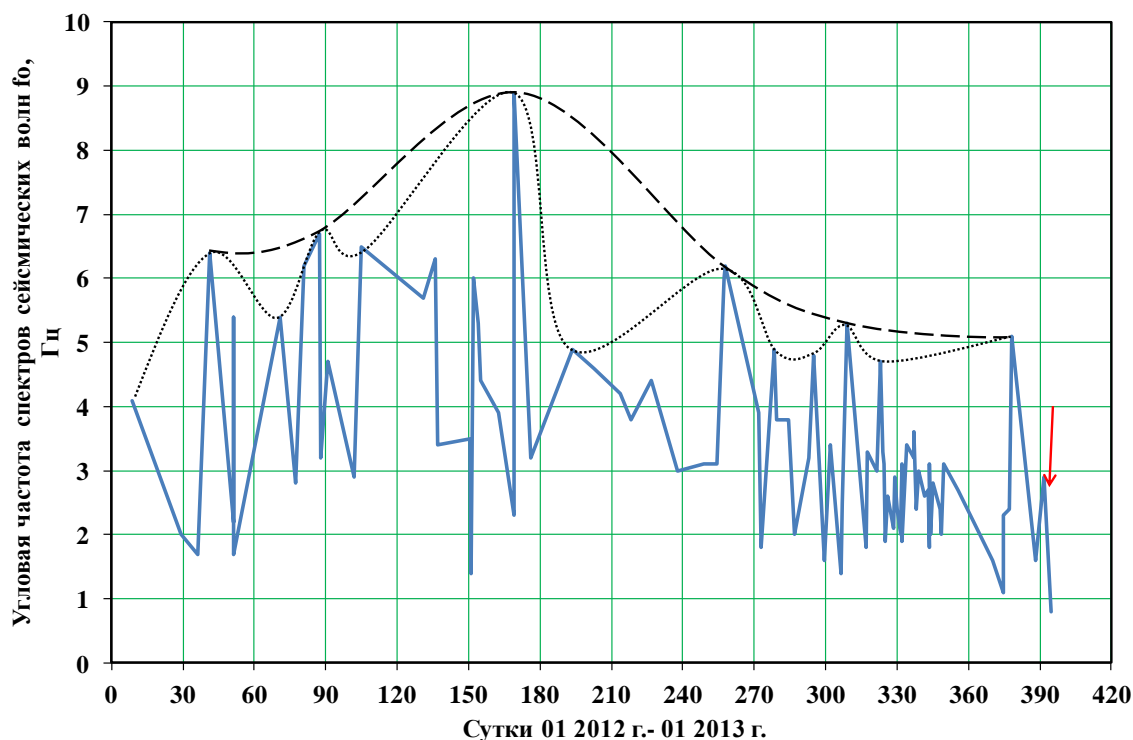


Рисунок 17. График изменения угловой частоты f_0 (Гц) спектра сейсмических волн очагов землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012-01.2013 гг. Циклы второго порядка обозначены точечными линиями, цикл первого порядка – пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $f_0=0.8$ Гц, 28 января 2013 г.).

График кумулятивной угловой частоты $\text{Кум}f_0$ (Гц) спектра сейсмических волн в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 гг. показан на рисунке 18. Он

неровный, ступенчатый, что выражает динамические циклы. Тренд Кумфо выражается полиномом третьей степени:

$$\text{Кумфо} = 510 \cdot 10^{-6} x^3 - 0,0019 x^2 + 0,8388 x - 15,402, \quad R^2 = 0,98, \quad (12)$$

где Кумфо - кумулятивная угловая частота (Гц) сейсмических волн в очагах землетрясений, x - годы, R^2 - достоверность аппроксимации.

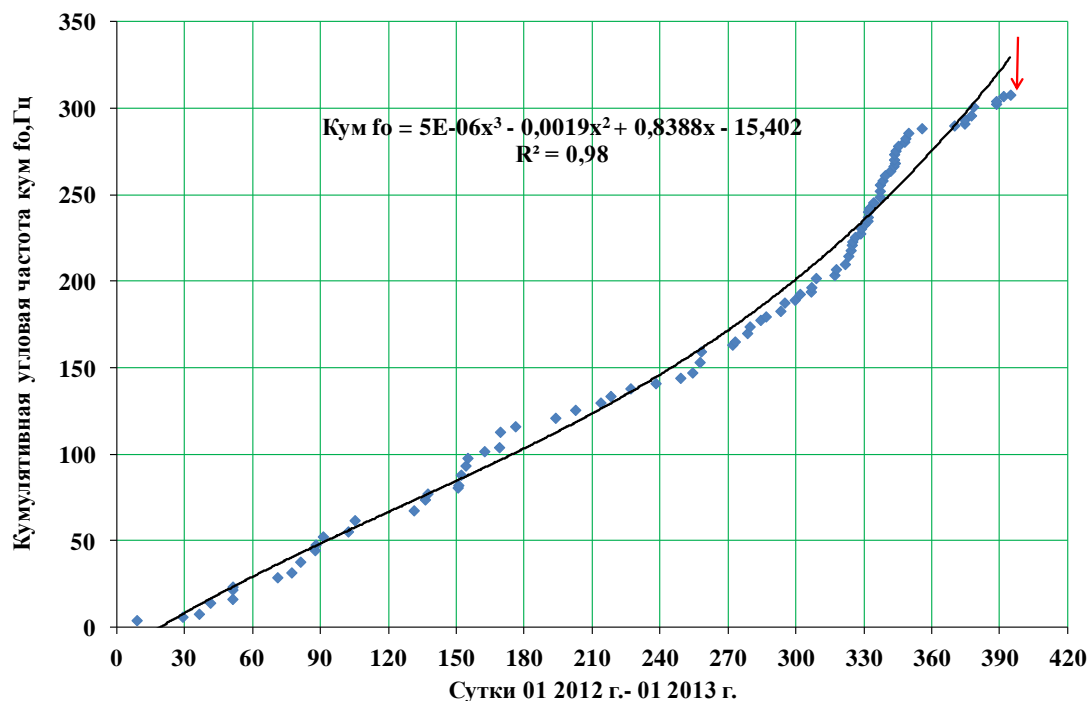


Рисунок 18. Кумулятивная угловая частота Кумфо (Гц) спектра сейсмических волн в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 гг. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15,1$, $f_0 = 0,8$ Гц, 28 января 2013 г.).

Распределение моментной магнитуды землетрясений M_w имеет мозаичный характер (рисунок 19). Фон поля моментной магнитуды $M_w < 3,6$. Относительно большие значения магнитуды отмечались в пределах юго-восточного сегмента Таласо-Ферганского разлома, поднятий Нура, Нарынтоо и восточной части поднятия Терскей, где произошло землетрясение Каркыра-Сарыжаз (28.01.2013 г. $M_w = 6,0$).

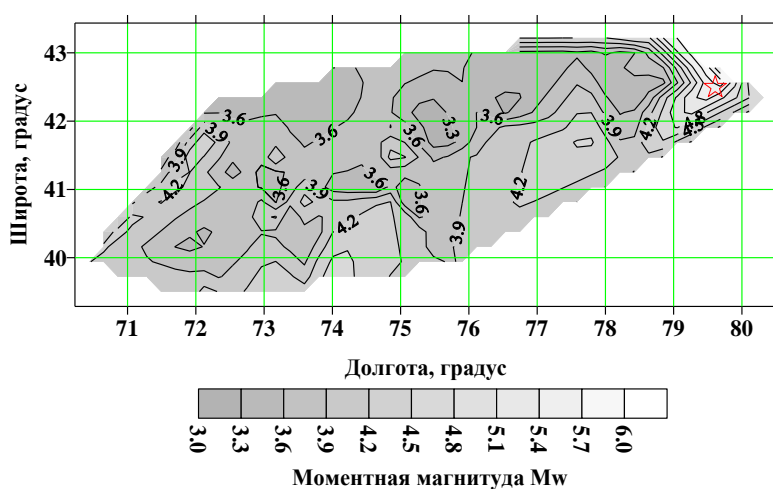


Рисунок 19. Распределение моментной магнитуды M_w в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013г. Звездочкой обозначен эпицентр землетрясения Каркыра-Сарыжаз ($K_R = 15,1$, $M_w = 6,0$, 28.01.2013 г.).

Результат анализа M_w в последовательности землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012 г. – 01.2013 г. показан на рисунке 20. Отмечены сейсмические циклы первого и второго порядков. Период повторения циклов, в частности, второго порядка составлял около 120 и 243 суток.

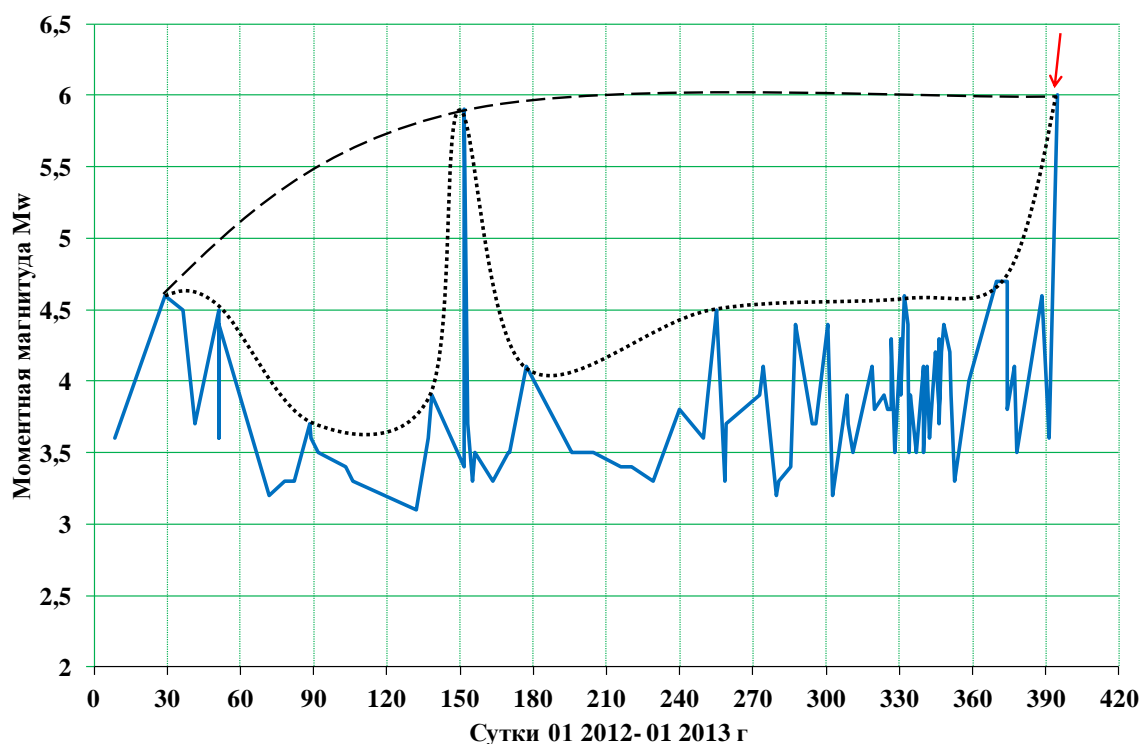


Рисунок 20. График изменения моментной магнитуды M_w в очагах землетрясений Тянь-Шаня во времени за 01.2012- 01.2013 гг. Циклы второго порядка обозначены точечными линиями, цикл первого порядка –пунктирной линией. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра – Сарыжаз ($K_R = 15.1$, $M_w = 6.0$, 28 января 2013 г.).

На рисунке 21 показан график кумулятивной моментной магнитуды $\text{Кум}M_w$. Тренд её выражается полиномом третьей степени:

$$\text{Кум}M_w = 10^{-5}x^3 - 0.0054x^2 + 1.1557x - 20.249, R^2 = 0.98, \quad (13)$$

где $\text{Кум}M_w$ – кумулятивная моментная магнитуда землетрясений, x - годы, R^2 - достоверность аппроксимации. В интервале времени 320-350 суток отмечалась большая скорость накопления, а перед землетрясением Каркыра-Сарыжаз- малая скорость накопления $\text{Кум}M_w$.

Для решения важных практических задач сейсмического районирования, прогноза сейсмической опасности, сейсмостойкого строительства, палеосейсмологии и других областей ключевую роль играют, в частности, зависимость моментной магнитуды от средней подвижки $M_w(AD)$ и зависимость угловой частоты спектра от моментной магнитуды $f_0(M_w)$. На рисунке 22 показан график зависимости $M_w(\lg AD)$, которая выражается формулой:

$$M_w(\lg AD) = 0.5655 \lg AD + 4.622, 2\sigma = 0.9, R^2 = 0.5, \quad (14)$$

где M_w – моментная магнитуда землетрясений, AD - средняя подвижка по разлому очага землетрясения, R^2 - достоверность аппроксимации, σ - стандартное отклонение. Верхний предел M_w определяется с учётом $2\sigma = 0.9$.

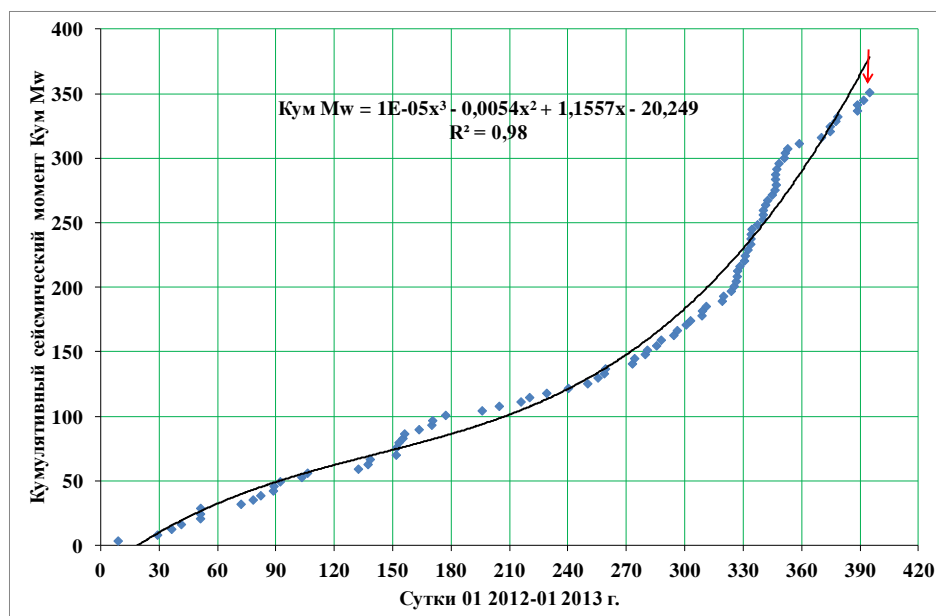


Рисунок 21. Кумулятивная моментная магнитуда (КумMw) в очагах землетрясений Тянь-Шаня за 01.2012-01.2013 гг. Красной стрелкой обозначено землетрясение Каркыра-Сарыжаз ($K_R=15.1$, $M_W=6.0$, 28 января 2013 г.).

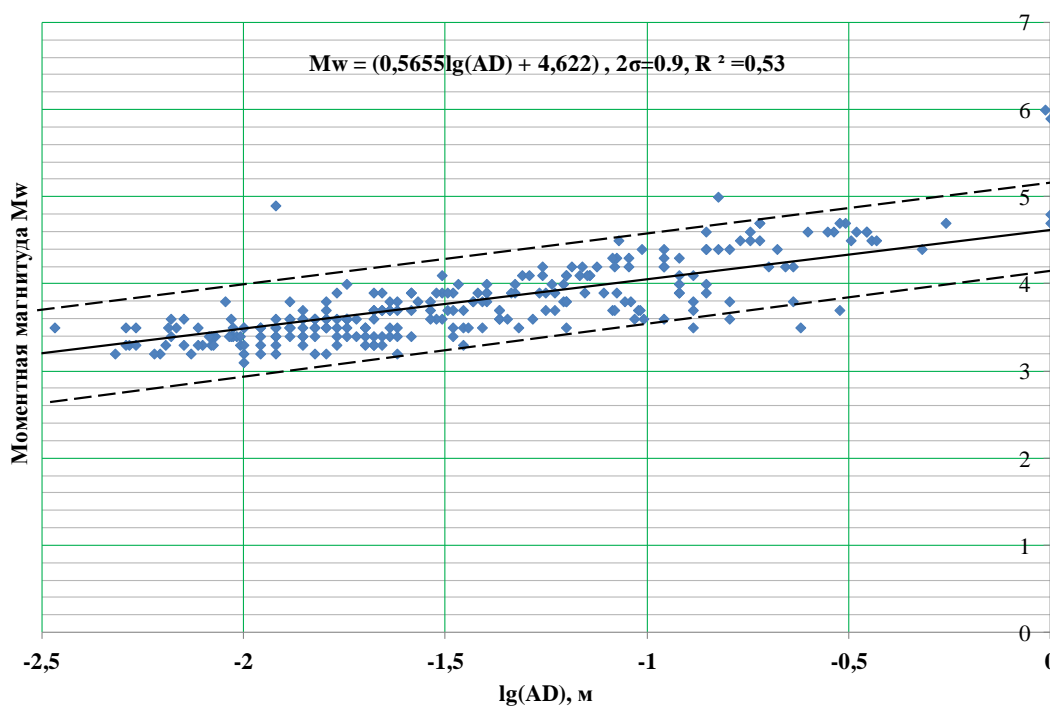


Рисунок 22. График зависимости моментной магнитуды $M_W(\lg AD)$ от средней подвижки $AD=0.003-1.0$ м. Верхний предел флуктуации $M_W(\lg AD)$ определяется с учётом $2\sigma=0.9$.

Зависимость угловой частоты от моментной магнитуды $\lg f_0(M_W)$ (рисунок 23) выражается формулой:

$$\lg f_0 = (-0.2889M_W + 1.6002) \pm 0.23, R^2 = 0.57, \quad (15)$$

где f_0 – угловая частота (Гц), M_W – моментная магнитуда землетрясений, ± 0.23 – верхний и нижний пределы $\lg f_0$, R^2 – достоверность аппроксимации.

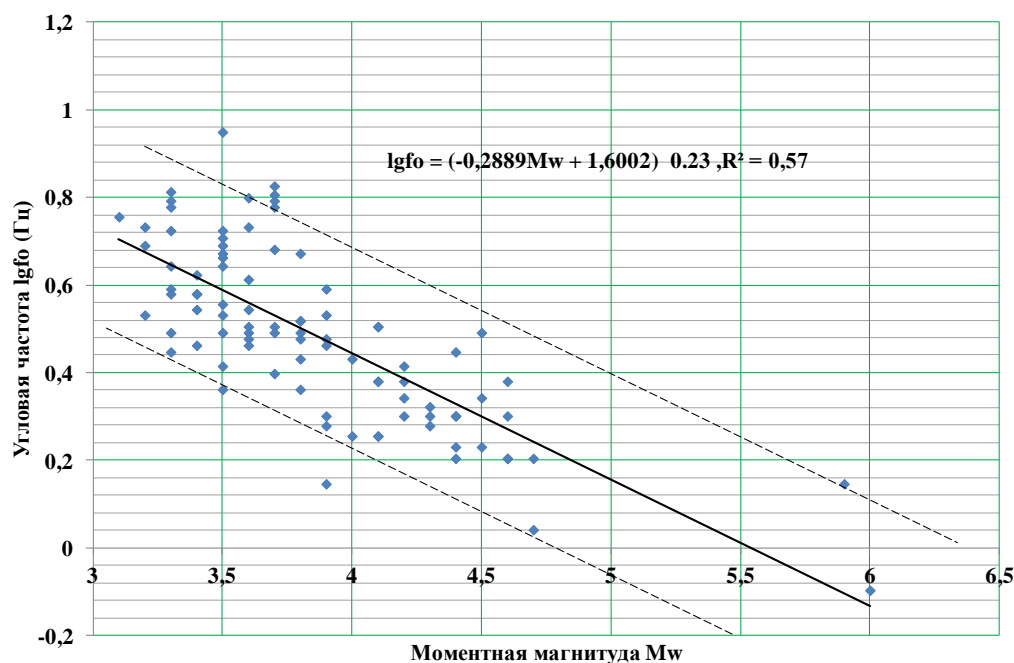


Рисунок 23. График зависимости угловой частоты от моментной магнитуды $lgfo(Mw)$.

Заключение

1. Осуществлён анализ динамических параметров очагов землетрясений Тянь-Шаня: f_0 - угловой частоты спектра поперечной волны; AD - средней подвижки по разлому; $\Delta\sigma$ - сброшенного напряжения; μ - жёсткости - модуля сдвига, M_0 - сейсмического момента, M_w - моментной магнитуды на основе каталога динамических параметров Института сейсмологии НАН Кыргызстана по данным сетей цифровых станций KRNET (ИС НАН КР), KNET (ИС РАН) и сетей соседних стран.
2. Отмечены мозаичные районы раннего «центробежного» и позднего «центростремительного» проявления очагов на сегментах активных структур Тянь-Шаня.
3. При изменении динамических параметров в последовательности очагов землетрясений Тянь-Шаня выделены иерархии динамических циклов, состоящие из фазы активизации, пика активизации, фазы спада активизации и фазы затишья. Отмечено, что последовательностям циклов разного порядка свойственны характерные периоды повторения.
4. Изучение кумулятивных динамических параметров показало, что накопление их происходит не линейно, а ступенчато, фрактально. Тренды их выражаются полиномами третьей степени с большими коэффициентами аппроксимации $R^2=0.95-0.98$.
5. Определена функция зависимости моментной магнитуды M_w от средней подвижки (AD) по разлому очага:

$$M_w(LgAD)=0.5655lgAD+4.622, 2\sigma=0.9, R^2=0.5,$$

где M_w – моментная магнитуда землетрясений, AD - средняя подвижка по разлому очага землетрясения, R^2 - достоверность аппроксимации. Верхний предел M_w определяется с учётом $2\sigma=0.9$. Определена функция зависимости угловой частоты f_0 от моментной магнитуды M_w :

$$lgfo=(-0.2889M_w+1.6002) \pm 0.23, R^2=0.57,$$

где f_0 – угловая частота (Гц), M_w - моментная магнитуда землетрясений, ± 0.23 верхний и нижний пределы $lgfo$, R^2 - достоверность аппроксимации.

6. Результаты анализа динамических параметров необходимы для решения важных задач сейсмического районирования, прогноза землетрясений, сейсмостойкого строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. // *J. Geophys. Res.* -1970. –v.75. –N.26 –P.4997-5009.
2. Мамыров Э.М., Омуралиев М., Кальметьева З.А., Жээнбаев М. Инструкция по определению динамических параметров землетрясений на базе цифровых записей KNET. Фонды ИС НАН КР.
3. Отчёт о научно-производственной деятельности центра обработки данных Института сейсмологии НАН КР за 2012-2013 гг.
4. Омуралиев М. Спектры объёмных сейсмических волн в ближней зоне и динамические параметры очага землетрясений Тянь-Шаня по широкополосным записям станций сейсмологической сети KNET. // *Наука и новые технологии.* -1998. -№4. - С.44-50.
5. Омуралиев М., Омуралиева А. Сейсмическое излучение в близких зонах от землетрясений по данным локальной сети сейсмических станций. // *Известия НАН КР.* -2006. -№1. -С.34-43.
6. Омуралиев М., Омуралиева А., Молдобекова С. Динамическая сегментация активных разломов и модель развития очага землетрясений Тянь-Шаня. Сборник материалов четвёртого международного симпозиума 15-20 июня 2008 г. “Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы”. Москва-Бишкек, 2009, с. 446-452.
7. Омуралиев М. Динамика сегментации активного разлома и развития очага землетрясения. // *Вестник ИС НАН КР.* -№2(12). -2018. -с.63-79.
8. Jin A., Aaron C., Ando M. Simultaneous Determination of Responses Source Parameters of Small Earthquakes along the Atotsugawa Fault Zone. // *Central Japan Bull. of SSA.* - 2000. -V.90. -№6. -P.1430-1445.
9. Thatcher W., Hanks T.C. Source Parameters of Southern California Earthquakes // *J. Geoph. Res.* -1973. -V.78-№35. -P.8547-8576.
10. Касахара К. Механика землетрясений. Москва-Мир. 1985, 264 с.
11. Kanamori H. The energy release in great earthquakes. // *J.Geophys.Res.* -1977. -v.82.- P.2981-2987.
12. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. Bishkek. -2004. -166 p.
13. Aki K. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1994. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wave spectrum. // *Bull.Earthq.Res.Inst.*, Tokyo University. -1966b. -44. –P.73-88.

Рецензент к.ф.-м.н. Фролова А.Г.