

УДК 550.34

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

## ЗАДАЧА БЕНЬОФФА И АФТЕРШОКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

**Аннотация:** В статье рассматриваются афтершоковые процессы землетрясений Тянь-Шаня и фундаментальная задача Беньоффа. Приводятся результаты решения задачи Беньоффа на основе теории дислокации сейсмологии и особенности афтершоковых процессов.

**Ключевые слова:** Землетрясение, афтершок, тип деформации, сейсмическая энергия, магнитуда, энергетический класс, сейсмическая волна, гравитационная волна, главный толчок, сейсмогенный разлом, последовательность проявления афтершоков, цикличность, период сейсмической активизации, период сейсмического затишья, собственное колебание

## ТЯНЬ-ШАНДАГЫ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДҮН АФТЕРШОКТУК ПРОЦЕССТЕРИ ЖАНА БЕНЬОФ МАСЕЛЕСИ

**Кыскача мазмуну:** Макалада Тянь-Шандагы жер-титирөөлөрүн афтершоктук процесстери жана Беньоф фундаменталдык маселеси каралган. Афтершоктук процесстердин өзгөчөлүктөрү жана Беньоф маселесинин чечилишинин жыйынтыктары сейсмологиянын дислокация теориясынын негизинде келтирилет.

**Негизги сөздөр:** Жер титирөө, афтершок, деформациянын тиби, сейсмикалык энергия, магнитуда, энергиялык класс, сейсмикалык толкун, гравитациялык толкун, негизги силкинүү, сейсмогендик жарака, афтершоктордун болушунун ырааттуулугу, кайталануу, сейсмикалык активдештирүүнүн мезгили, сейсмикалык басандоо мезгили, өздүк (жекелик) термелүү.

## BENIOFF PROBLEM AND AFTERSHOCK PROCESSES OF THE TIEN SHAN EARTHQUAKES

**Abstract:** Aftershock processes of the Tien Shan earthquakes and fundamental problem of Benioff are discussed in the paper. The results of solving the Benioff problem based on the theory of dislocation in seismology and features of aftershock processes are presented.

**Keywords:** Earthquake, aftershock, deformation type, seismic energy, magnitude, energy class, seismic wave, gravity wave, main shock, seismogenic fault, sequence of aftershocks, cyclicity, seismically active period, seismically calm period, natural oscillation.

Последовательность проявления афтершоков землетрясения важный вопрос сейсмологии и привлекает внимание многих исследователей. В Японии Фусакичи Омори впервые сформулировал эмпирическое правило для повторяемости афтершоков [1] в виде формулы:

$$N(1 + Rt) = A \quad (1)$$

где  $N$  – число афтершоков в течение выбранного интервала времени (например, часа или суток), середина которого приходится на момент времени  $t$  после возникновения главного толчка,  $R$  и  $A$  – постоянные, выбираются так, чтобы удовлетворяли имеющиеся данные. Рихтер отметил [1], что «методика работы (Омори) определена неполно, а её значение несколько сомнительно, так как используется только число афтершоков без учёта быстрого убывания их магнитуды. С физической точки зрения следует предпочесть формулу, более определенно связанную с излучением энергии». Беньоф с учётом этих положений провёл анализ афтершокового процесса [2]. Он принял, что деформация, высвобождаемая при каждом

афтершоке пропорциональна квадратному корню из энергии, выделяющейся в виде волн. При этом энергия была определена по магнитудам в соответствии с их соотношением. Составлялся график суммарной высвобожденной деформации. Абсцисса графика являлась логарифмом времени. Время считалось от начала главного толчка. Отмечено, что график состоит из двух отрезков: прямолинейный и криволинейный, переходящий в горизонтальный. Прямолинейную часть связывал с деформацией сжатия среды и предположил, что криволинейный отрезок соответствуют условиям бокового течения или оползневой массе, вероятно, подкоровой. Соответственно задача Беньофа состоялась в изучении механизма и процессов проявления афтершоков, которые вместе с главным толчком представляют собой систему землетрясения. Данная задача до сих пор оставалась открытой.

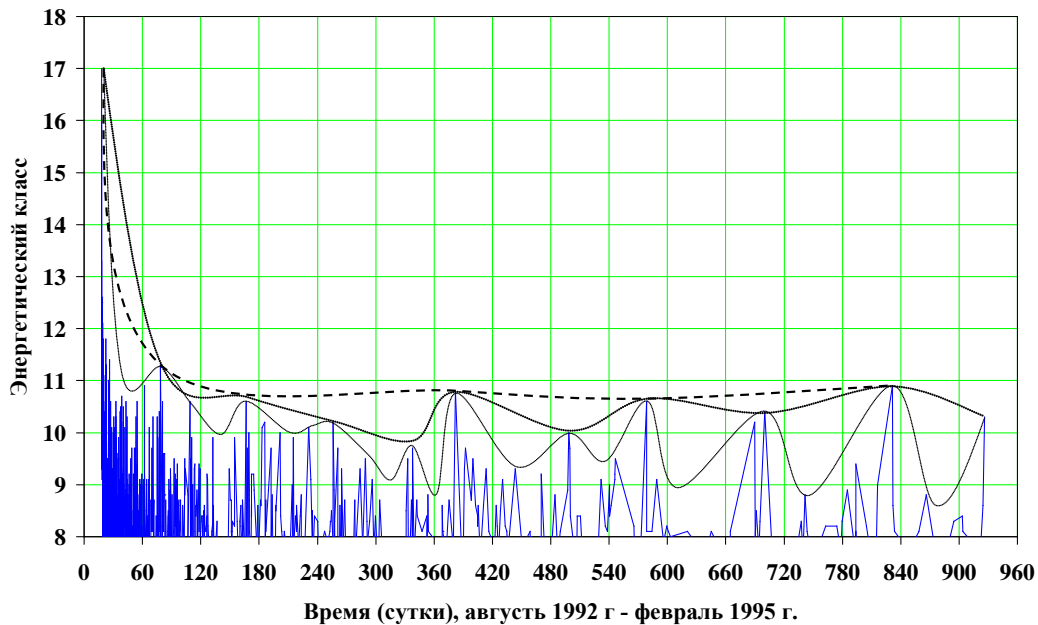
Рассмотрим афтершоки Суусамырского землетрясения (19 августа 1992 г.,  $M=7.3$ ,  $K=17$ ) Тянь-Шаня, где имеются сравнительно достоверные данные. Суусамырское землетрясение проявилось в зоне Предарамсуйского разлома вбросового типа субширотного простирания южного падение. На висячем южном крыле разлома формировалась Арамсуйская антиклинальная асимметричная структура с пологим южным крылом и крутым северным крылом. Во время главного толчка в долине р. Суусамыр в зоне Предарамсуйского разлома образовался сейсмогенный разлом взбросо - сдвигового характера и асимметричный сейсмоступ протяженностью более 1000 м на южном висячем крыле этого сейсмогенного разлома [3]. Южное крыло уступа было пологим, имело ширину около до 300 м (на меридиане центральной части). Данный сейсмогенный разлом имел широтное простирание и крутой угол падения  $80^{\circ}$ - $85^{\circ}$ . Амплитуда взбросовой составляющей достигала 280 см, величина сдвига составляла 250 см. При этом истинная (полная) величина подвижки (смещения) составляла 380 см, угол вектора с горизонтом был равен  $48^{\circ}$ - $49^{\circ}$  и смещение было направлено на запад. Величина смещения по сейсмогенному разлому постепенно уменьшалась по простиранию к его концам (вершинам). Таким образом, вектор смещения имеет важное значение при определении механизма очага.

Севернее основного сейсмогенного разрыва на расстоянии 20-35 м проявились побочные сравнительно короткие сейсмогенные разрывы также с южным азимутом падения. Они являются ответвлением основного сейсмогенного разрыва и расположены кулисно правосторонне. Важно отметить, что как и зона правостороннего сейсмогенного разлома, так и сейсмогенные разрывы (сегменты) в этой зоне расположены кулисно правосторонне. Во время Суусамырского землетрясения образовался сейсмогенный разлом и в зоне Предсуусамыртооского разлома на висячем южном крыле формировалась асимметричная Суусамыртооская антиклиналь, поднятая до 3900 м. Данный сейсмогенный разлом имел надвигово-сдвиговый характер.

Гипоцентр Суусамырского землетрясения находился на глубинах около 25 км [3]. Результаты определения механизма очага главного толчка показали (по данным Института сейсмологии НАН КР)], что ось сжатия ориентирована по азимуту  $171^{\circ}$  под углом  $14^{\circ}$  (с горизонтали), а ось растяжения направлена по азимуту  $21^{\circ}$  под углом  $73^{\circ}$ . Соответственно механизм очага имел надвиговый тип деформации. Возможная (одна нодальная) плоскость разрыва в очаге имела простирание  $89^{\circ}$ , угол падения  $58^{\circ}$ . На основании имеющихся данных отмечено, что сейсмогенный разлом главного толчка на глубине около гипоцентра имел угол падения  $58^{\circ}$ , а на верхней части земной коры –  $80$ - $85^{\circ}$ , т.е. при распространении разлома очага с глубины к земной поверхности надвиговый тип деформации трансформировался в взбросо-сдвиговый тип деформации. Это важное положение в изучении динамической сегментации разломов и процесса развития очага.

После главного толчка через 8 минут 22 сек проявился сильный афтершок с энергетическим классом  $K=15.2$ , а через 1 час 0 мин и 1 час 8 мин проявились афтершоки с  $K=16$  и  $15.8$ , соответственно. В связи с этим, Суусамырское землетрясение можно считать тройным, даже 4-ным землетрясением. Основные части афтершоков проявились до 1995 г. На

рисунке 1 приведена последовательность проявления афтершоков разного энергетического класса.



**Рисунок 1.** Последовательность проявления афтершоков различного энергетического класса.

Сейсмическая активизация афтершоков спадала, энергетический параметр убывался и на фоне этого спада наблюдались периоды активизации и затишья первого и второго порядков. В последовательности проявления афтершоков отмечаются пять циклов активизации нижнего (первого) порядка, которые последовательно принимали значения: сначала 60,59 суток, после 88,02 суток, 215,10 суток, 197,01 суток, 252,75 суток. В этих циклах проявились циклы следующего, более высшего порядка. При этом, в третьем цикле проявились три цикла с периодами 89,53 суток, 71,83 суток и 48,74 суток, в четвертом цикле – два цикла с периодами 117,58 суток, 79,42 суток, а в пятом цикле проявились два цикла с периодами: 121,37 суток и 131,38 суток.

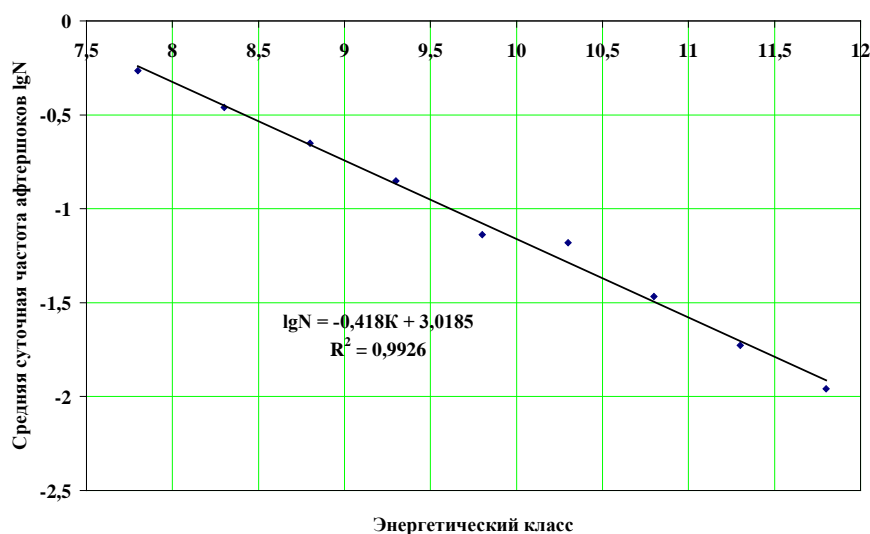
Развитие афтершокового процесса землетрясения предопределено проявлением внутренних гравитационных волн (своеобразных «цунами») в земной коре, литосфере, мантии и во внешнем и внутреннем ядре Земли [4], аналогичными внутренним гравитационным волнам в океане (море, озере) и атмосфере [5, 6]. Они обусловлены тем, что выведенные из состояния равновесия части страфицированной среды вертикального столбца под действием силы (например, силы Архимеда) стремятся вернуться в свое исходное положение. Для внутренних волн типичен цуговой (колебательный) характер строения в пространстве и во времени, а также выделенная направленность распространения и переход к уединенным волнам. Записи длиннопериодных волн (полученных и отмеченных Беньофом) крупных землетрясений, таких как Чилийского (1960) и Аляскинского (1964), а также Камчатского (1952), показали, что эти волны выражены в виде собственных колебаний Земли с периодами около 54; 35,5; 25,8; 20; 13,5; 11,84 и 8,4 мин [7]. Собственные колебания делятся на сфероидальные и крутильные.

Циклы в последовательности проявления афтершоков, очевидно, выражают внутренние гравитационные уединенные волны на границах различных слоев Земли. Изменение периодов циклов характеризует динамические внутренние гравитационные волны, в результате проявления, в частности активного тепло-массопереноса в различных слоях Земли. Этому частично свидетельствуют изменения скоростных свойств среды и активизации флюидного режима участка земной коры и верхней мантии после крупномасштабного промышленного взрыва [8] и повторных взрывов на горнорудных объектах [9].

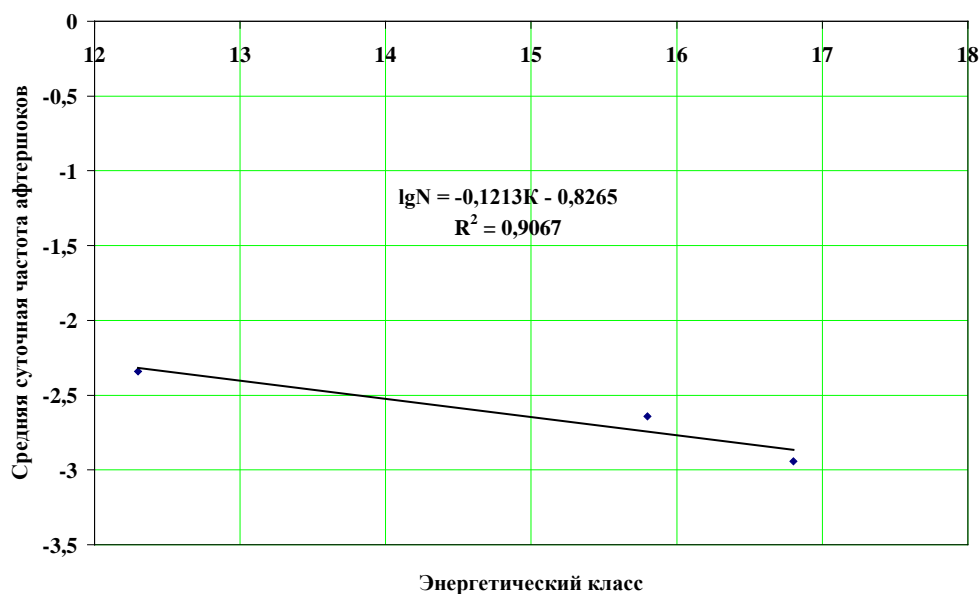
Факт нарушения геодинамического равновесия в районе водохранилищ (при заполнении и разгрузки воды) свидетельствует о том, что геофизическая среда обычно находится в ограниченном устойчивом состоянии. По сравнению с этим очаговая область землетрясения имеет огромный масштаб. Так, при Суусамырском землетрясении объем очаговой области составлял  $3,3E+14 \text{ км}^3$ , масса области, которая подвергалась перемещению, достигала около  $9E+17$  тонн. Все это, очевидно, вызвало нарушение равновесия на глубинах, в частности, между литосферой и мантией, между мантией и ядром Земли, где возникали внутренние гравитационные уединенные волны, распространяющиеся по вертикали.

Результаты определения среднесуточных частот в интервалах энергетического класса: 7.6-8.0, 8.1-8.5, 8.6-9.0, ..., 16.6-17.0 показали, что повторяемость афтершоков в интервалах энергетического класса  $K=7.6-12.0$  и  $K=12.0-17.0$  разные (рисунок 2) и на  $K=12$  наблюдается своеобразный перегиб графика повторяемости.

а



б



**Рисунок 2.** Повторяемость афтершоков Суусамырского землетрясения за 1992-1995 гг. в интервалах энергетического класса: а -  $K=7.6-12.0$ , б -  $K=12.0-17.0$ .

Повторяемость афтершоков с  $K=7,6-12,0$  выражается формулой:

$$\lg N = -0,418K + 3,018, \quad R^2 = 0,99, \quad (2)$$

где  $N$  – средняя суточная частота,  $K$  – энергетический класс,  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Повторяемость же афтершоков с  $K=12.0-17.0$  выражается формулой:

$$\lg N = -0,121K - 0,826, \quad R^2 = 0,91, \quad (3)$$

где  $N$  – средняя суточная частота,  $K$  – энергетический класс,  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Соответственно среднесуточный период повторения афтершоков с  $K=7,6-12,0$  выражается формулой:

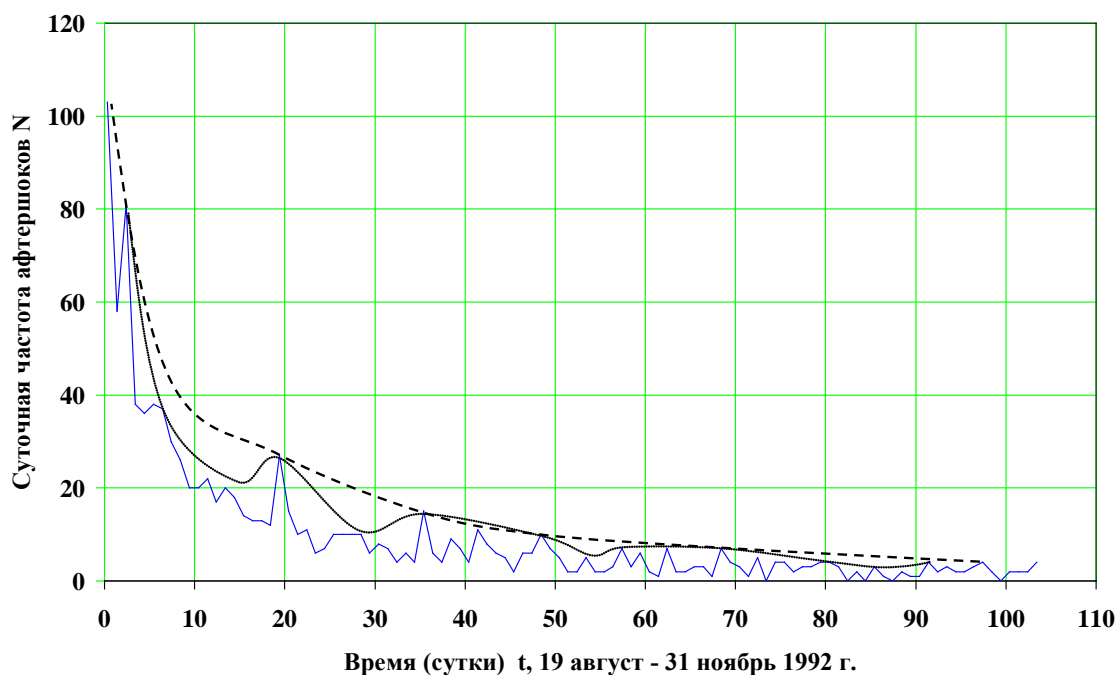
$$\lg T = 0,418K - 3,018, \quad R^2 = 0,99, \quad (4)$$

где  $T$  – среднесуточный период повторения,  $K$  – энергетический класс,  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Период повторения же афтершоков с  $K=12,0-17,0$  выражается формулой:

$$\lg T = 0,121K + 0,826, \quad R^2 = 0,91, \quad (5)$$

где  $T$  – среднесуточный период повторения,  $K$  – энергетический класс,  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Изменение суточного числа афтершоков приведено на рисунке 3. На графике наблюдается уменьшение значений суточной частоты и отмечаются своеобразные циклы относительного увеличения и уменьшения числа афтершоков.

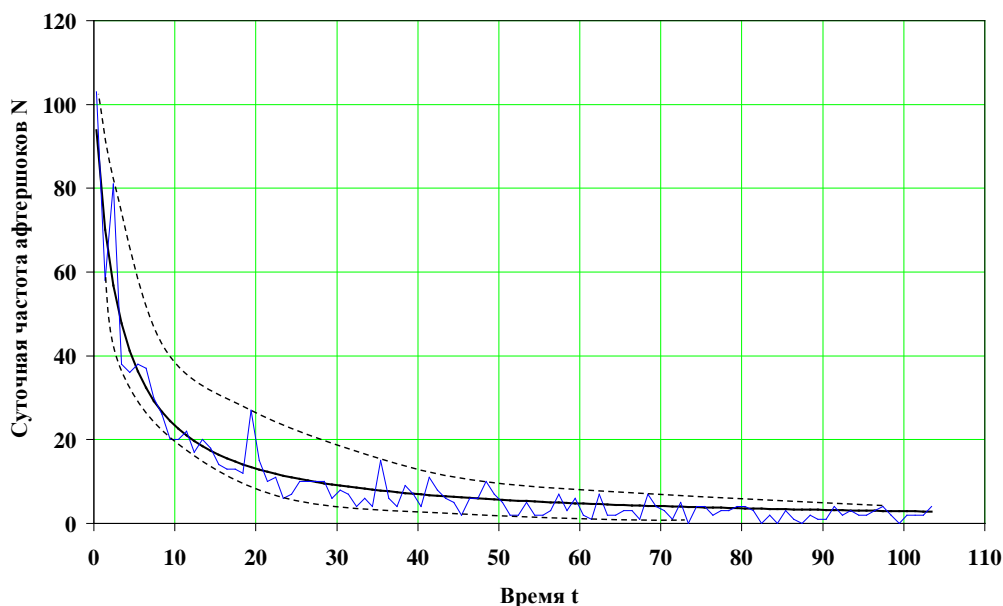


**Рисунок 3.** Изменение суточной частоты афтершоков Суусамырского землетрясения (19 августа 1992 г.,  $M=7.3$ ).

В соответствии с методом Омори [1] определены параметры  $A=103$ ,  $R=0,5$  и формула (1) принимает вид:

$$N(1 + 0,5t) = 103, \quad (6)$$

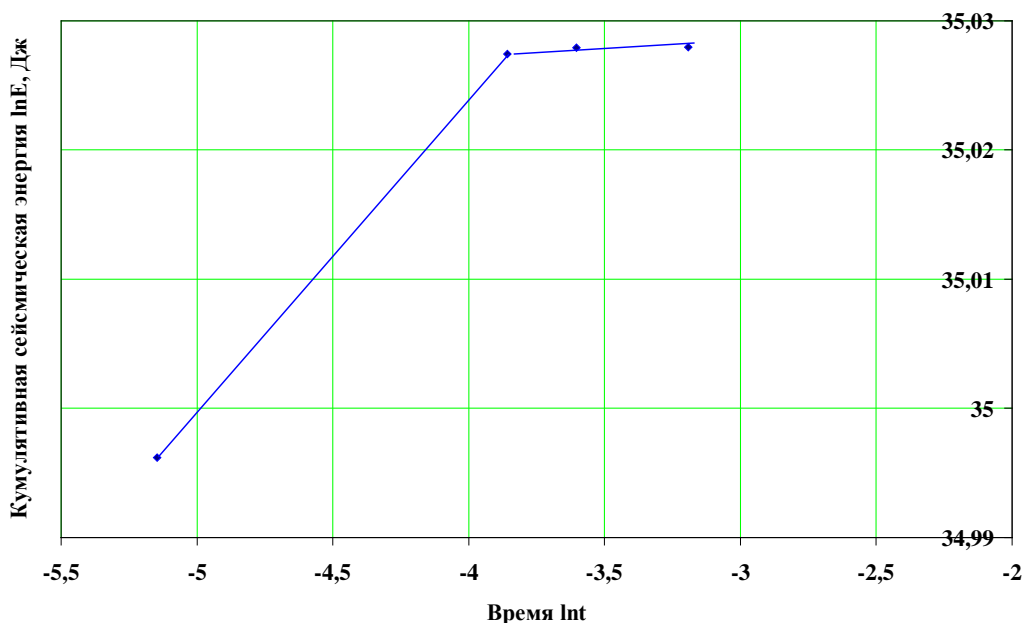
где  $N$  – число афтершоков в течение суток,  $t$  – момент времени после возникновения главного толчка. Графики расчётных и фактических данных приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Графики фактической и расчетной суточных частот афтершоков. Сплошной синей линией обозначены фактические данные, чёрной линией - расчётные данные.

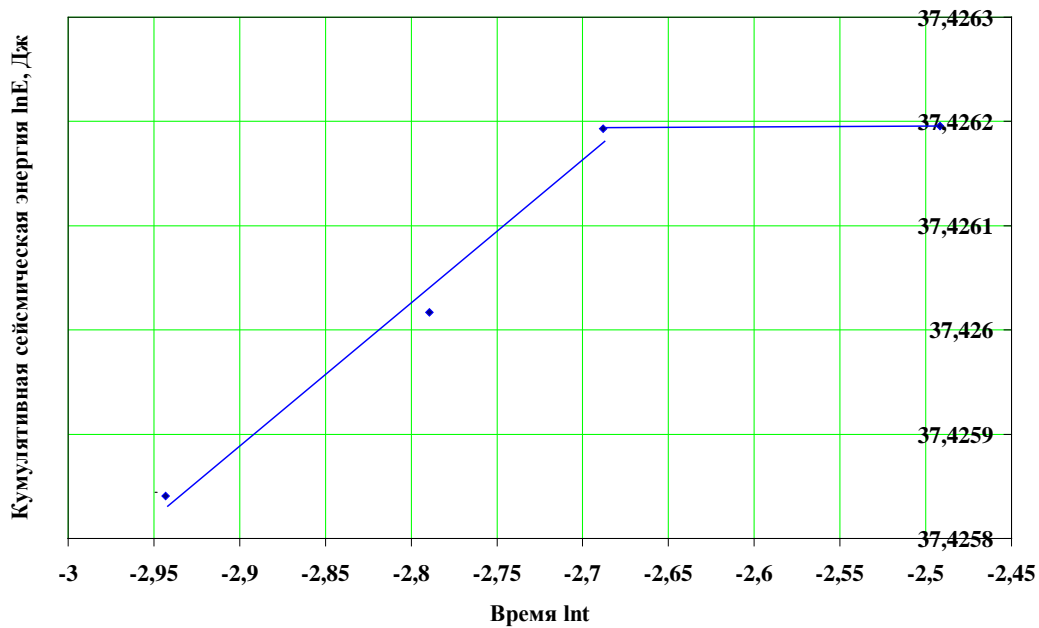
Кумулятивная сейсмическая энергия, очевидно, выражает природу афтершокового процесса. Энергию афтершока можно определить непосредственно из энергетического класса  $K = \lg E$  (Дж) Раутиана. Афтершоковый процесс состоит из различных этапов развития (рисунок 5). После главного толчка с 2 часов 34 минут по 3 часа 3 минут проявился первый этап и характеризовался двумя фазами линейных изменений кумулятивной сейсмической энергии (рисунок 5.а). В 3 часа 12 минут отмечался скачкообразный переход на следующий этап с проявлением сильного афтершока с  $K=16.0$ . С 3 часов 20 минут по 4 часа 3 минут проявился очередной этап с двумя фазами линейных изменений кумулятивной сейсмической энергии (рисунок 5.б).

а



**Рисунок 5.а.** График изменения кумулятивной сейсмической энергии афтершоков с 2 часов 34 минут по 3 часа 3 минут после главного толчка Суусамырского землетрясения (19 август 1992 г.), состоящий из двух линейных отрезков.

б



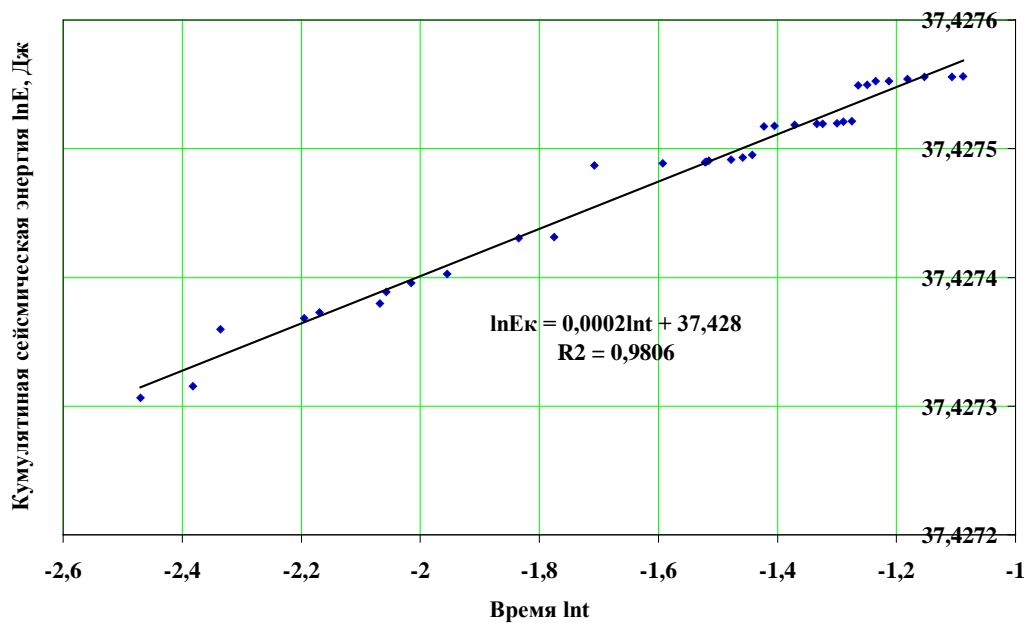
**Рисунок 5.б.** График изменения кумулятивной сейсмической энергии афтершоков с 3 часов 20 минут по 4 часа 3 минуты после главного толчка Суусамырского землетрясения, состоящий из двух линейных отрезков.

С 4 часов 6 минут по 10 часов 19 минут развивался четвертый этап (рисунок 5.в.), который характеризовался линейным изменением кумулятивной сейсмической энергии:

$$\ln E_k = 0,0002 \ln t + 37,428, \quad R^2 = 0,98, \quad (7)$$

где  $E_k$  – кумулятивная сейсмическая энергия,  $t$  – время,  $R^2$  - достоверность аппроксимации.

в



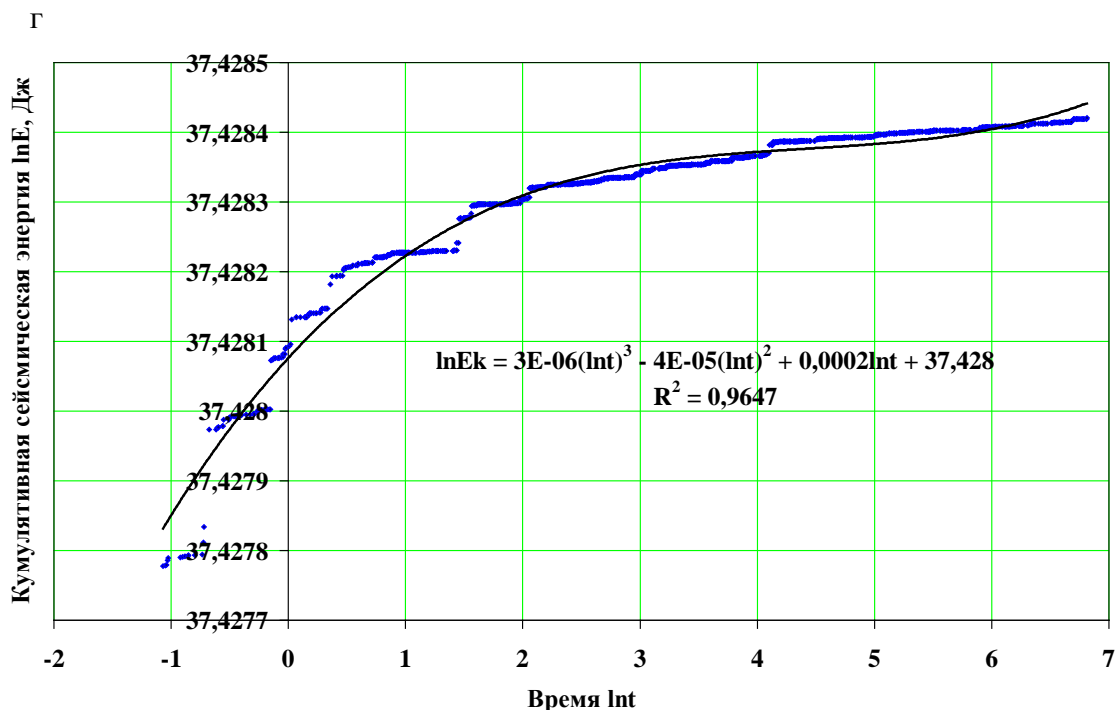
**Рисунок 5.в.** График изменения кумулятивной сейсмической энергии афтершоков с 4 часов 6 минут по 10 часов 9 минут после главного толчка Суусамырского землетрясения.



С 10 часов 17 минут 19 августа 1992 г. по 11 часов 0 минут 2 февраля 1995 г. после главного толчка Суусамырского землетрясения изменение кумулятивной сейсмической энергии характеризовалось кривой линией переходящей в горизонтальную (рисунок 5.г.):

$$\ln E = 3E - 06(\ln t)^3 - 4E - 05(\ln t)^2 + 0,0002 \ln t + 37,43, \quad R^2 = 0,964 \quad (8)$$

где  $E_k$  – кумулятивная сейсмическая энергия,  $t$  – время,  $R^2$  – достоверность аппроксимации.



**Рисунок 5.г.** График изменения кумулятивной сейсмической энергии афтершоков с 10 часов 17 минут 19 августа 1992 г. по 11 часов 0 минут 2 февраля 1995 г. после главного толчка Суусамырского землетрясения.

Рассмотрим характер изменения деформации по мере появления афтершоков. Величина деформации  $\varepsilon$  в соответствии с теорией дислокации [10] является отношением сброшенного напряжения  $\sigma$  на жёсткость  $\mu$  среды

$$\varepsilon = \sigma / \mu \quad (9)$$

Притом известно [10] соотношение:

$$E/M_0 = \sigma / 2\mu, \quad (10)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент (дин·см),  $E$  – сейсмическая энергия (эрг),  $\sigma$  – сброшенное напряжение,  $\mu$  – жёсткость. Из (9) и (10) находим:

$$\varepsilon = 2 E/M_0 \quad (11)$$

На основании инструментальных данных (спектральных и очаговых параметров) землетрясений на территории Кыргызстана определена эмпирическая формула [11], выражающая соотношение сейсмического момента  $M_0$  (Н·м) и сейсмической энергии  $E$  (Дж) в определённых частях Тянь-Шаня:

$$\lg M_0 = p \lg E + q, \quad (12)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент (Н·м),  $E$  – сейсмическая энергия (Дж),  $p$  – коэффициент,  $q$  – постоянная. В пределах поднятий Молдотгоо, Джумгалтоо и Суусамыртоо, куда входит область Суусамырского землетрясения величины  $p=0,68$ ,  $q=8,0$  и формула (12) принимает вид:

$$\lg M_0 = 0,68 \lg E + 8,0, \quad (13)$$

Раутиан Т.Г. и др. [12] для Средней Азии получили региональную зависимость:



$$\lg M_0 = 0,77K + 13,8, \quad (14)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ),  $K = \lg E$  (Дж) – энергетический класс. Однако, ими не учтено то, что в разных областях выделяются различные интервалы относительно малых и больших энергетических классов, где величины  $p$ ,  $q$  отличаются.

Нами для Средней Азии получено соотношение сейсмического момента  $M_0$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ) и энергии  $E$  (Дж):

$$\lg M_0 = 0,762 \lg E + 6,918, \quad R^2 = 0,85. \quad (15)$$

Жёсткость среды  $\mu$  и величина сброшенного напряжения  $\sigma$  связаны эмпирической формулой:

$$\lg \eta = 0,697 \lg \sigma + 6,214, \quad R^2 = 0,73. \quad (16)$$

Это означает, что жёсткость среды изменчива и является не статической, а динамической величиной. Принятая точка зрения, что жёсткость земной коры равна  $\mu = 3,7 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> является приближённой.

Величины сброшенного напряжения  $\sigma$  и деформации  $\varepsilon$  связаны в первом приближении соотношением:

$$\sigma = 112618\varepsilon + 7,2996. \quad (17)$$

На сочленении юго-западной части Тянь-Шаня и Туранской плиты (в районе Газли) сейсмический момент  $M_0$  и энергии  $E$  связаны эмпирической формулой:

$$\lg M_0 = 0,461 \lg E + 9,902, \quad R^2 = 0,74 \quad (18)$$

Жёсткость среды находилась в пределах значений  $1,56 \cdot 10^{11} - 1,60 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>.

Величины деформации  $\varepsilon$  и сброшенного напряжения  $\sigma$  связаны соотношением:

$$\varepsilon = 6 \times 10^{-6} \sigma - 2 \times 10^{-6}, \quad R^2 = 0,9998 \quad (19)$$

т.е. имеют тесную взаимосвязь.

Рассмотрим высвобождение деформации афтершоков Суусамырского землетрясения. Для каждого афтершока с определенным  $K = \lg E$  по (13) оценивается величина сейсмического момента  $M_0$ , далее по (11) определяется величина деформации. Полученные величины деформации более точные, чем параметр  $E^{1/2}$  [2] и значение сеймотектонической деформации [13, 14]. Это обусловлено тем, что, в частности, при оценки сеймотектонической деформации используются данные в выбранных элементарных объёмах: механизм очага, наклон графика повторяемости, сейсмическая активность, толщина сейсмоактивного слоя, глубины гипоцентра и другие параметры с относительно большими погрешностями.

График суммарной высвобожденной деформации афтершоков приведён на рисунке 6. Процесс высвобождения деформации состоит из трёх состояний. Первое состояние характеризуется линейным изменением кумулятивной деформации от 2 часов 34 минут по 3 часов 3 минут (рисунок 6.а) и выражается формулой:

$$\varepsilon_k = 0,0054 \ln t + 0,0033, \quad R^2 = 0,986, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_k$  – кумулятивная деформация,  $t$  – время,  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Второе состояние представляет собой скачкообразный переход от первого состояния в третье состояние. Третье состояние афтершокового процесса характеризуется нелинейным изменением кумулятивной деформации за время  $t$  от 3 часов 20 минут 19 августа 1992 г. по февраль 1995 г. (рисунок 6.б) и выражается формулой:

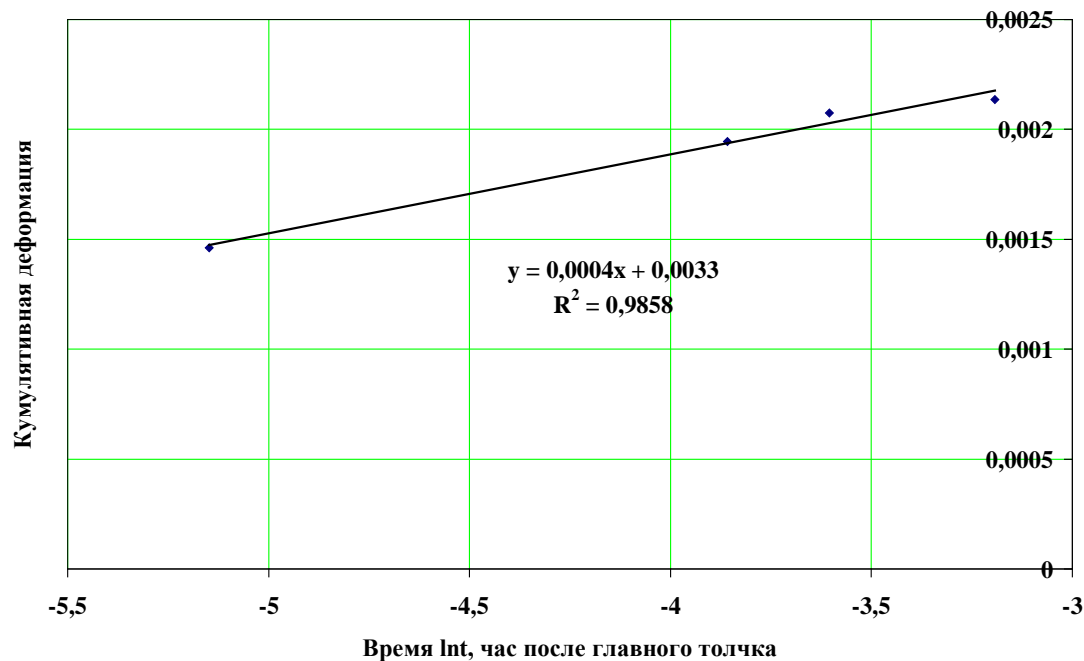
$$\varepsilon_k = -3E - 5(\ln t)^3 + 0,0002(\ln t)^2 + 0,0023 \ln t + 0,0121, \quad R^2 = 0,999, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_k$  – кумулятивная деформация,  $t$  – время,  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Скорость высвобождения деформации в первом состоянии составляет  $1,2276 \cdot 10^{-6}$  сек<sup>-1</sup>, во втором состоянии –  $1,0233 \cdot 10^{-5}$  сек<sup>-1</sup>, в начале третьего состояния – около  $1,243 \cdot 10^{-7}$  сек<sup>-1</sup>, а в

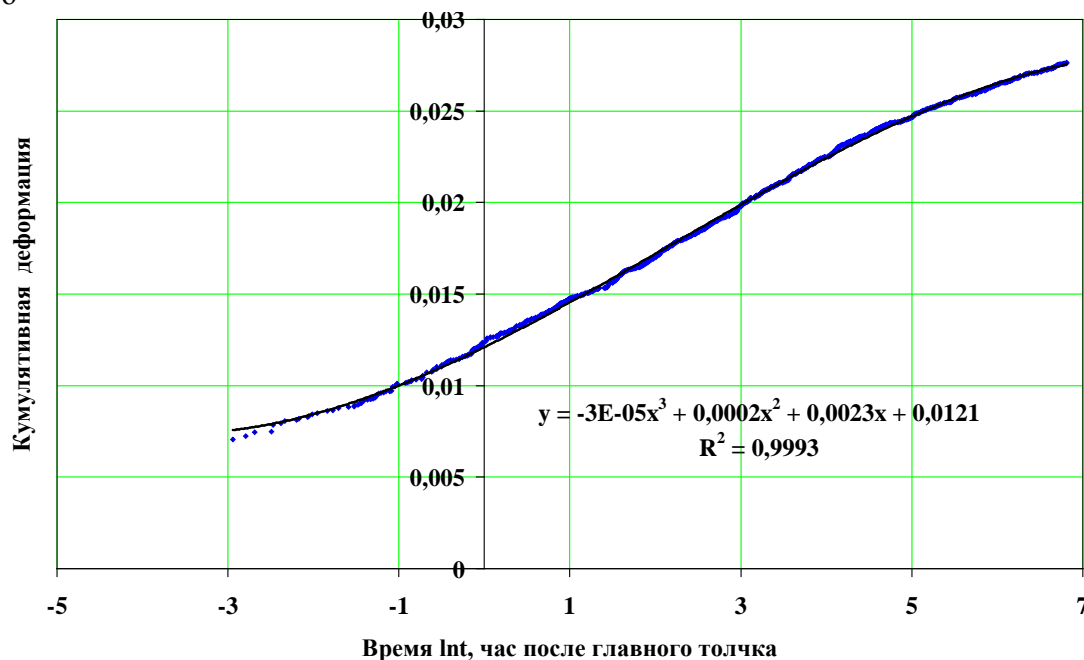
интервале времени от 19 часов 22 минут 21 августа по 5 часов 12 минут 8 сентября 1992 г. составляет около  $3,36 \cdot 10^{-9}$  сек<sup>-1</sup>. В первой половине февраля 1995 г. на завершении афтершокового процесса Суусамырского землетрясения скорость высвобождения деформации принимала значение около  $1,2487 \cdot 10^{-10}$  сек<sup>-1</sup>.

а



**Рисунок 6.а.** График высвобождения деформации за интервал времени с 2 часов 34 минут по 3 часа 3 минут 19 августа 1992 г.

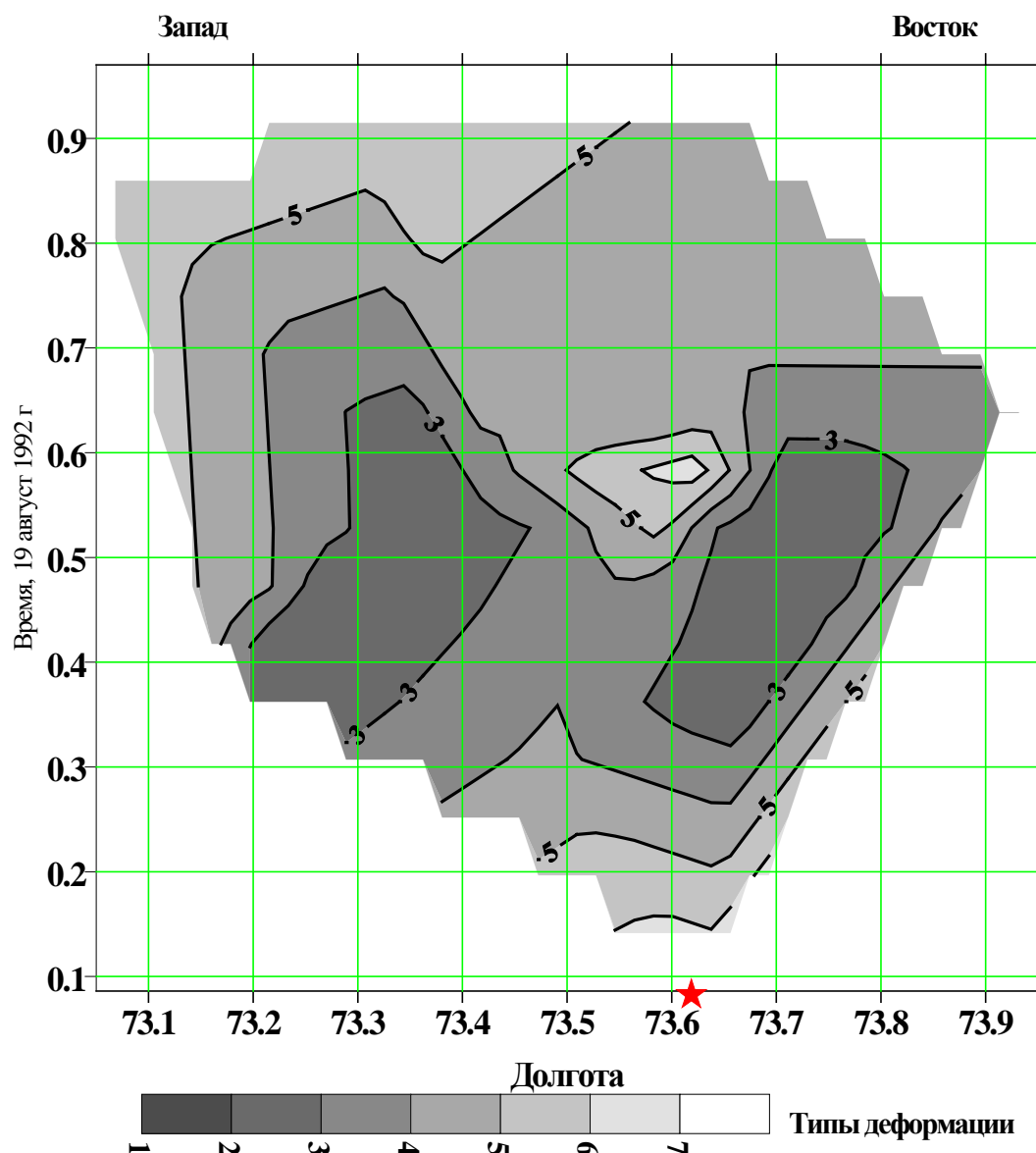
б



**Рисунок 6.б.** График высвобождения деформации за интервал времени с 3 часов 20 минут 19 августа 1992 г. по 11 часов 0 минут 2 февраля 1995 г.

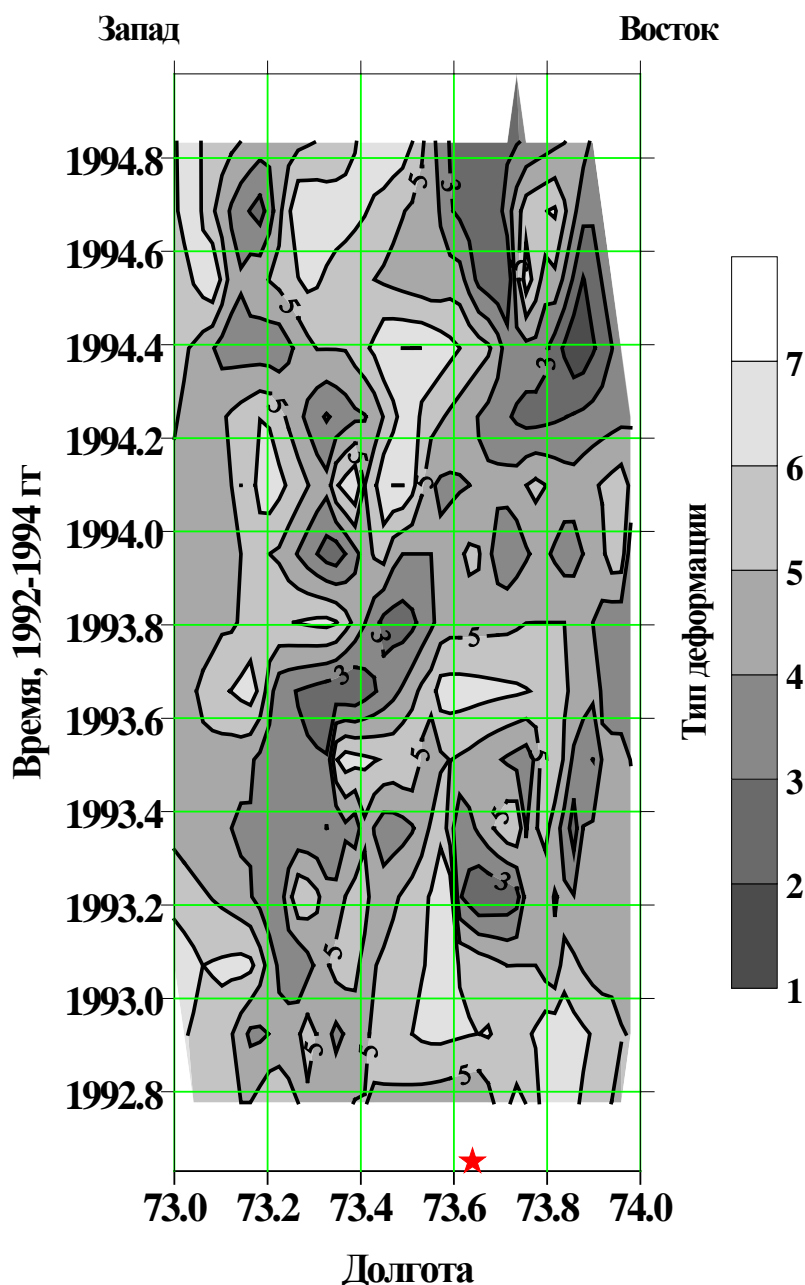
В связи с вышеизложенными результатами необходимо привести данные определения механизмов очагов афтершоков Суусамырского землетрясения (по данным Института

сейсмологии НАН Кыргызстана). На рисунке 7 приведено распределение типов деформации в очагах афтершоков 19 августа 1992 г. вдоль очаговой области.



**Рисунок 7.** Пространственно-временное распределение типов деформации в очагах афтершоков Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. вдоль очаговой области. Типы деформации: 1-сдвиг, 2-сброс, 3-сдвиго-сброс, 4-надвиг, 5-сдвиго-надвиг, 6-взброс по крутой плоскости, 7-взброс. Звездочкой обозначен эпицентр главного толчка.

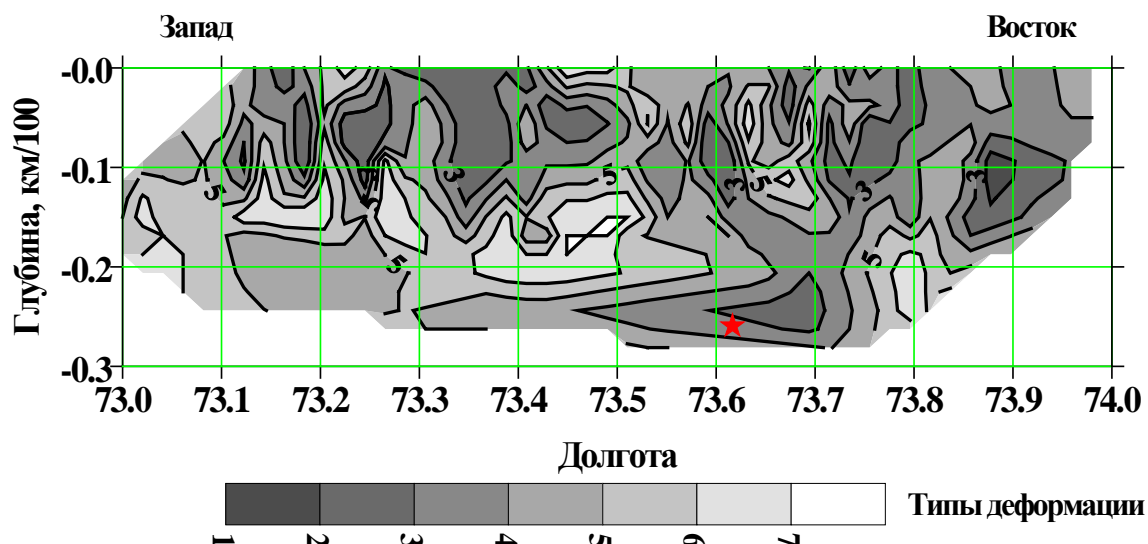
В начале афтершокового процесса в очагах проявились надвиговые, сдвиго-надвиговые и взросовые типы деформации. С около 8 часов после главного толчка отмечался на западной и восточной частях очаговой области преимущественно сдвиго-сбросовый тип деформации. С 14 часов после главного толчка снова проявились преимущественно взбросовый, сдвиго-надвиговый, надвиговый типы деформации в очагах афтершоков. Пространственно-временное распределение типов деформации в очагах афтершоков вдоль очаговой области с 19 августа 1992 г. до 1995 г. приведено на рисунке 8. Здесь наблюдается чередование полей преимущественно сдвиго-надвигового, надвигового типов деформации с полями сдвиго-сбросового типа деформации.



**Рисунок 8.** Пространственно-временное распределение типов деформации в очагах афтершоков Суусамырского землетрясения вдоль очаговой области с 19 августа 1992 г. до 1995 г. Типы деформации: 1-сдвиг, 2-сброс, 3-сдвиго-сброс, 4-надвиг, 5-сдвиго-надвиг, 6-взброс по крутой плоскости, 7- взброс. Звездочкой обозначен эпицентр главного толчка.

В распределении типов деформации в очагах афтершоков по глубинам вдоль очаговой области (в широтном направлении) с 1992 г. до 1995 г. отмечается (рисунок 9), что в нижней части области (на глубинах около 15-25 км) проявились преимущественно сдвиго – надвиговой, надвиговой, взбросовой типы деформации, а в верхней части области (на глубинах около 0-15 км) преобладал сдвиго-сбросовой тип деформации.

Пространственно-временное распределение типов деформации в очагах афтершоков позволяет сказать, что в пределах очаговой области Суусамырского землетрясения поочередно сменялись процессы сжатия и растяжения. Это, очевидно, отражает распространение деформационных волн.



**Рисунок 9.** Распределение типов деформации в очагах афтершоков Суусамырского землетрясения по глубинам вдоль очаговой области с 1992 г. до 1995 г. Звездочкой обозначен гипоцентр землетрясения.

### Заключение

1. Изучен афтершоковый процесс Тянь-Шаня на примере афтершоков Суусамырского землетрясения (19 августа 1992 г.,  $M=7.3$ ,  $K=17.0$ ), наиболее крупного события за последние 40 лет.
2. В последовательности проявления афтершоков разного энергетического класса наблюдался общий спад сейсмической активности, уменьшение энергетических параметров афтершоков. На фоне этого спада проявились цикличности, смена относительной активизации и затишья первого и второго порядков. Цикличность первого (относительного низкого) порядка имела последовательность периодов: 60,6 суток, 88,0 суток, 215,1 суток, 197 суток, 252,8 суток. Цикличность второго (относительно высшего) порядка имела последовательность периодов: 89,5 суток, 71,8 суток, 48,7 суток, 117,8 суток, 79,4 суток, 121,4 суток, 131,4 суток. Отмечено, что эти цикличности обусловлены внутренними гравитационными уединенными сверхдлинными волнами, образованными в земной коре, верхней и нижней мантии, внешнем и внутреннем ядре Земли.
3. Установлено, что повторяемость афтершоков - зависимость среднесуточной частоты от энергетического класса нелинейная. График повторяемости можно разделить на две линейные части для малых энергетических классов, например,  $K=7.6-12.0$ :

$$\lg N = -0,418K + 3,018, \quad R^2 = 0,99,$$

и больших энергетических классов, например,  $K=12,0-17,0$ :

$$\lg N = -0,121K - 0,826, \quad R^2 = 0,91.$$

Соответственно, определены среднесуточные периоды повторения афтершоков.

4. По методу Омори определена повторяемость афтершоков. Повторяемость афтершоков, например, Суусамырского землетрясения выражается формулой:

$$N(1 + 0,5t) = 103,$$

где  $N$  – число афтершоков в течение суток,  $t$  – момент времени после возникновения главного толчка.

5. На основании сравнительного анализа данных энергии по методу Беньофа через магнитуды и по Раутиан (с использованием инструментальных материалов) отмечено, что в физическом смысле предпочтительно использовать последний. В связи с этим изучено

изменение кумулятивной сейсмической энергии афтершоков местосуммарной величины  $E^{1/2}$ , принятой Беньофом. Отмечено два состояния афтершокового процесса в интервалах времени (на примере афтершоков Суусамырского землетрясения за 1992 -1995 гг.): 1- с 2 часов 34 минут 19 августа по 10 часов 9 минут 19 августа 1992 г. и 2 - с 10 часов 17 минут 19 августа 1992 г. по 11 часов 0 минут 2 февраля 1995 г. Первое состояние, в свою очередь, состоит из трех этапов с двумя фазами. Последовательность этапов афтершокового процесса переходит скачками. Фазы характеризуются свойственными линейными изменениями кумулятивной сейсмической энергии. Второе состояние афтершокового процесса характеризуется нелинейным изменением кумулятивной сейсмической энергии и выражается эмпирической формулой:

$$\ln E = 3E - 06(\ln t)^3 - 4E - 05(\ln t)^2 + 0,0002 \ln t + 37,43, \quad R^2 = 0,964,$$

где  $E_k$  – кумулятивная сейсмическая энергия,  $t$  – время,  $R^2$  - достоверность аппроксимации.

6. На основании теории дислокации сейсмологии, инструментальных данных спектральных и очаговых параметров и эмпирической формулы взаимосвязи сейсмического момента  $M_0$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ) и энергии ( $\text{Дж}$ ):

$$\lg M_0 = p \lg E + q,$$

где  $M_0$  - сейсмический момент ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ),  $E$  – сейсмическая энергия ( $\text{Дж}$ ),  $p$  – коэффициент,  $q$  – постоянная (для площади поднятий Молдоттоо, Джумгалтоо и Суусамыртоо  $p=0,68$ ,  $q=8,0$ ), определена величина высвобожденной деформации

$$\varepsilon = 2 E/M_0.$$

Отмечено, что величина этой деформации имеет большую точность, чем величина деформации, определяемая по сейсмотектоническому методу Ризниченко.

Впервые установлена взаимосвязь жёсткости среды  $\mu$  и величины сброшенного напряжения  $\sigma$  землетрясений, которая выражается на примере Средней Азии эмпирической формулой:

$$\lg \eta = 0,697 \lg \sigma + 6,214, \quad R^2 = 0,73.$$

Жёсткость среды  $\mu$  динамическая величина, а не статическая. Первое состояние афтершокового процесса характеризуется линейным изменением кумулятивного высвобождения деформации:

$$\varepsilon_k = 0,0054 \ln t + 0,0033, \quad R^2 = 0,986,$$

где  $\varepsilon_k$  – кумулятивная деформация,  $t$  – время,  $R^2$  – достоверность аппроксимации. Второе состояние представляет собой скачкообразный переход от первого состояния в третье состояние. Третье состояние афтершокового процесса характеризуется нелинейным изменением кумулятивной деформации и выражается формулой:

$$\varepsilon_k = -3E - 5(\ln t)^3 + 0,0002(\ln t)^2 + 0,0023 \ln t + 0,0121, \quad R^2 = 0,999,$$

где  $\varepsilon_k$  – кумулятивная деформация,  $t$  – время,  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Скорость высвобождения деформации в первом состоянии составляет  $1,2276 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$ , во втором состоянии –  $1,0233 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ , в начале третьего состояния - около  $1,243 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ .

7. Изучено пространственно-временное распределение типов деформации в очагах афтершоков. Отмечено, что в пределах очаговой области поочередно сменяются процессы сжатия и растяжения. Это отражает распространение деформационных волн, а именно внутренних гравитационных уединенных волн земной коры, мантии и ядра Земли. Сдвиго-сбросовый и сдвиго-надвиговый типы деформации афтершоков свидетельствуют о том, что внутренние гравитационные волны, вероятно, имеют крутильный характер, кроме сфероидального.

**Литература**

1. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М.:Изд. Иностран. Литературы, 1963, -671 с.
2. Benioff H. Earthquakes and rock creep. Part1 //BSSA, 1951, 51, 31-62.
3. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. Bishkek, 2004. – 166 p.
4. Омуралиев М., Землянский А.А., Ачакеев Э. Управляющие параметры Северо-Тяньшанской активной зоны перед проявлением Кеминского землетрясения. //Сборник докладов 5-ой международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», 2013. - С.105-112.
5. Госсард Э.Э., Хук У.Х., Волны в атмосфере..., пер. с англ., М.:Мир, 1978, -532 с.
6. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных воли в океане, Л.:Гидрометеиздат, 1981, -302 с.
7. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983, -416 с.
8. Омуралиев М., Омуралиева А. Изменение состояния среды литосферы после крупномасштабного Камбаратинского взрыва 2009 г. //Сборник докладов 5-ой международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», 2013. - С.89-95.
9. Омуралиева А., Омуралиев М. Кумторские взрывы и изменения состояния среды земной коры и верхней мантии в ральное время//Известия вузов, №6, 2012, с.70-77.
10. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985.-264 с..
11. Джанузаков К.Дж., Омуралиев М., Омуралиева А. и др. Сильные землетрясения Тянь-Шаня в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов стран Центральной Азии. Бишкек. Илим. 2003.-206 с.
12. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981, с.109-110.
13. Ризниченко Ю.В. Связь течения горных масс с сейсмичностью //ДАН СССР, 1965.Т161, №1, с.97-99.
14. Ризниченко Ю.В. Расчет скоростей деформации при сейсмическом течении горных масс //Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977, №10, с.34-47.