

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СПАДА НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ДВУХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ)

Л.М. Богомолов<sup>1</sup>, Н. А. Сычева<sup>2</sup>, А.С. Закупин<sup>1</sup>, П.А. Каменев<sup>1</sup>, И.В. Сычев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, E-mail: [l.bogomolov@imgg.ru](mailto:l.bogomolov@imgg.ru),

ул. Науки 1Б, 693022, г.Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Научная станция РАН, г Бишкек, Киргизия,

Бишкек-49, 720049, Киргизия

<sup>3</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,

Ул. Коптюга 3, г.Новосибирск, Россия

*Проведен статистический анализ каталогов динамических параметров очагов землетрясений на территории двух сейсмоактивных зон: Южных Курильских островов и северного Тянь - Шаня. Для построения корреляций динамических параметров использованы данные с большим числом записей для компактных зон, значительно превышающим этот показатель в других работах. Воспроизведен результат, что корреляции между магнитудой  $M$  и сейсмическим моментом  $M_0$  значительно выше, чем для  $M_0$  и спада напряжений в очагах,  $\Delta\sigma$ . Для обоих изучаемых регионов отмечено чередование периодов времени с низкими значениями спада напряжений,  $\Delta\sigma < 1$  МПа в потоке событий, и обычных периодов с разбросом  $\Delta\sigma$  в пределах 0.1-10 МПа.*

*очаг, землетрясение, спектр, падение напряжений, сейсмический момент*

Значения падений напряжения в очагах землетрясений (ЗЛТ) может характеризовать региональные особенности геодеформационного процесса. Изменение со временем усредненного снятия напряжений для событий заданных магнитуд отражает напряженное состояние земной коры по диаграмме Кулона - Мора. Однако для такой характеристики необходим статистически значимый набор данных - достаточно большое число ЗЛТ, для которых определены динамические параметры очагов (радиус Брюна,  $r$ , скалярный сейсмический момент,  $M_0$ , и падение напряжения  $\Delta\sigma$ ). По сложившейся мировой практике динамические параметры очагов ЗЛТ определяются, в основном, для сильных землетрясений [1-4]. При этом составление каталога динамических параметров для компактной территории было возможно лишь для регионов с наиболее высокой сейсмической активностью. Важным примером является территория северо-восточной части Тихого Океана (в пределах 42-51° с.ш., 140-159° в.д.), для которой в работе [2] представлен каталог динамических параметров событий за 1969-1996 гг. Этот каталог был составлен по данным аналоговых (частотно-избирательных), а не цифровых сейсмостанций. Тем не менее, он остается уникальным и настоящее время, так как содержит более 430 решений для динамических параметров очагов. В настоящей работе продолжен анализ этого каталога, в частности вопроса о взаимных корреляциях динамических параметров и их корреляции с магнитудой. Внимание сосредоточено на области вокруг Южных Курильских островов, ограниченной координатами 42 - 46° с.ш., 144 - 151° в.д. В эту зону попадает 263 события из каталога динамических параметров очагов [2]. Зона Южных Курил выделяется своим наиболее высоким уровнем сейсмичности (даже на фоне всего сейсмоактивного региона). Интерес к указанной зоне обусловлен также тем, что там произошло Шикотанское ЗЛТ 4.10.1994,  $M_w = 8.3$  – одно из сильнейших сейсмических событий в мире в конце XX века.

При расчетах динамических параметров очагов для другого сейсмоактивного региона: Центральной Азии в работах [5,6] была продемонстрирована возможность и целесообразность расширения количества определяемых параметров  $r$ ,  $M_0$ ,  $\Delta\sigma$  за счет обработки записей ЗЛТ умеренных ( $M > 3.9$ ) или даже низких магнитуд ( $M > 3$ ). В недавней работе [7] представлен каталог динамических параметров для ЗЛТ на территории северного Тянь-Шаня в период 1998 – 2012 гг (по данным телеметрической KNET [8] из 10 сейсмостанций. Каталог содержит 85 событий с магнитудой 3-5 ( $K = 9.5-13.7$ ), что составляет 86% от общего числа событий (99) этого класса за исследуемый период. Это позволяет говорить о массовом определении радиуса очага  $r$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$ , и снятия напряжений  $\Delta\sigma$ , и о перспективе мониторинга динамических параметров на территории, контролируемой современной сейсмической сетью. При этом набор статистики данных о динамических параметрах очагов ЗЛТ в изучаемом регионе возможен за сравнительно небольшой период времени.

Представляет интерес сопоставить распределения спада напряжений по каталогу Бурымской Р.Н. [2] для зоны Южно - Курильских островов (оконтуренной рамкой 42 - 46° с.ш., 144 - 151° в.д.) и зоны Северного Тянь - Шаня внутри области (41° - 43° с.ш., 73° - 77° в.д., контролируемой сетью KNET. Важно отметить методические различия при расчетах динамических параметров в этих зонах. В первом случае в работе [2] расчет динамических параметров очагов ЗЛТ проводился по записям аналоговых сейсмостанций, и в соответствии с методическими рекомендациями прошлого столетия [9] спектральные параметры определялись непосредственно по записям станций (так называемые станционные ЧИСС спектры). Во втором случае при обработке сейсмограмм цифровых станций KNET в [6,7] применена современная методика расчета динамических параметров очагов ЗЛТ. Эта методика включает классический подход к выделению и интерпретации спектральных параметров [10-13] и зарекомендовавшие себя методы перехода от станционного спектра к очаговому (приведению к точке на референтном расстоянии от гипоцентра с учетом станционных поправок и трансформации спектра из-за частотной зависимости добротности среды [14-16]). Ниже будет показано, что, несмотря на методические различия, результаты расчетов распределений спада напряжений в очагах для двух разных регионов обнаруживают сходные черты. При расчетах динамических параметров очагов ЗЛТ на территории Северного Тянь-Шаня в работе [7] принимались следующие значения плотности, скорости поперечных волн и модуля сдвига:  $\rho=2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_S = 3.5$  км/с,  $G = 2 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Эти значения не отличаются существенно от соответствующих параметров в работе [2] для территории Тихоокеанского северо - востока.

**Теоретические основы.** Расчет радиуса очага,  $r$ , скалярного сейсмического момента,  $M_0$ , и падения напряжения,  $\Delta\sigma$ , проводится с использованием выражений, вытекающих из известной модели мгновенного смещения на некоторую величину  $D$  вдоль поверхности разрыва [10-13]. Сам очаг моделируется сферой, которую перерезает эта поверхность, а величина смещения  $D$  часто называется вектором Бюргера, по аналогии с теорией дислокаций. В такой модели величины радиуса  $r$  и момента  $M_0$  определяются по спектральным характеристикам сейсмограмм независимо друг от друга, а  $\Delta\sigma$  оказывается пропорциональным отношению  $M_0/r^3$  [10, 12]. Размер очага (или, радиус Брюна,  $r = r_B$ ) определяется формулой

$$r = 2.34 V_S / (2\pi f_0), \quad (1)$$

где  $V_S$  – скорость поперечных волн,  $f_0$  - угловая частота, определяемая по изменению (излому) линейного тренда спектральной плотности для сейсмограмм скорости. При применении формулы Брюна (1) обычно считается, что зона очага – сферическая, и смещение происходит

одновременно по всей плоскости разрыва. Тогда поверхность разрыва - круг с радиусом  $r$ , а его площадь равна  $S = \pi r^2$ . При этом скалярный сейсмический момент описывается следующим произведением  $M_0 = G \cdot S \cdot D$  ( $G$  - модуль сдвига по месту очага)

Выражение для расчета скалярного момента по низкочастотному пределу спектральной плотности смещения  $\Omega_0$  (или, кратко, НЧ амплитудой) вытекает из решений волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмических волн [17]. Это выражение записывается в форме

$$M_0 = 4\pi \rho R V_S^3 \Omega_0 / \Psi_0, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность пород в области очага,  $R$  - гипоцентральное расстояние,  $\Psi_0$  - фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва), среднее значение этого фактора принимается 0,64 [11]. Стоит отметить, что формула (2) справедлива для любых расстояний от источника, превышающих характерную длину волны, т.е. в волновой зоне [17]. Однако наибольшая точность определения  $\Omega_0$  получается для относительно небольших расстояний  $R$ , когда значения  $\rho$ ,  $V_S$ , в самом очаге и в референтной точке можно считать одинаковыми. Ввиду независимости  $M_0$ , определяемого выражением (2), от радиуса очага и наличием взаимосвязи с моментной магнитудой  $M_w$  (по Канамори)

$$M_w = 2/3 \lg M_0 - 10.7, \quad (3)$$

скалярный ряды значений  $M_0$  удобно выбирать в качестве базисных при анализе кросс-корреляций с другими динамическими параметрами. Для оценки падения напряжения для землетрясения с моментом  $M_0$  можно использовать выражение,

$$\Delta\sigma = 7M_0 / 16r^3,$$

где значение коэффициента пропорциональности между  $\Delta\sigma$  и отношением  $M_0 / r^3$  выбрано в соответствии с результатами расчетов [13].

Информация о временных зависимостях динамических параметров, в частности спада напряжений позволяет оценивать другие характеристики режима деформирования земной коры. Покажем это на примере отношения скоростей псевдопластической и упругой деформаций. В земной коре роль пластической (псевдопластической) деформации играет усредненная сеймотектоническая деформация, СТД [17], средняя скорость которой,  $\langle \dot{\epsilon} \rangle_{STD}$  за интервал времени  $\Delta T$  определяется выражением

$$\langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle_{STD} = (GV \Delta T)^{-1} \sum_{\alpha=1}^N M_0^\alpha m_{ij}^\alpha \quad (4)$$

В выражении (4) суммирование ведется по всем  $N$  событиям, произошедшим за время  $\Delta T$ , через  $V \sim \pi R^3$  обозначен выбранный объем,  $m_{ij}$  - единичный тензор момента очага [17]. Известно, наибольший вклад в суммарную деформацию в (6) вносят крупномagnitudeные события. При выборе сравнительно небольших интервалов  $\Delta T$  учет в (4) даже одного слагаемого, соответствующего этому событию, позволяет оценить скорость СТД деформации (подразумевается компонента, имеющая наибольшее значение, далее для нее тензорные индексы не указываются). Скорость упругой деформации,  $\langle \dot{\epsilon} \rangle_E$  можно оценить по реакции среды на изменение напряжения, равное по величине спаду  $\Delta\sigma$  для того же события

$$\langle \dot{\epsilon} \rangle_E = \Delta\sigma / (G \Delta T) \quad (5)$$

Отношение скоростей деформаций (4) и (5) можно преобразовать к форме

$$k_\epsilon = \langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle_{STD} / \langle \dot{\epsilon} \rangle_E \sim (G / \Delta\sigma) r^2 D / R^3 \quad (6)$$

Выражение в правой части (6) становится особенно наглядным при выборе в качестве характерного размера  $R$  среднего расстояния между сейсмогенными разрывами  $R_{CR}$  [18], т.е. когда деформации сравниваются в зоне, ненарушенной вплоть до последнего ЗЛТ.

$$k_{\epsilon} \sim (G / \Delta\sigma) (D/r) k_{II}^{-3}, \quad k_{II} = R_{CR} / r \quad (7)$$

В выражении (7) первый сомножитель – фактор спада напряжений, он имеет большую величину, второй (геометрический фактор) очень мал, а концентрационный параметр  $k_{II}$  превышает критическое значение  $\sim(5-10)$  [18]. Это выражение отражает очевидное обстоятельство, что при малых значениях  $\Delta\sigma$  роль псевдопластических деформаций возрастает, и (7) позволяет делать оценки для разных интервалов времени. Полезно отметить, что и в условном случае дислокационной пластичности, скорость которой  $\langle \dot{\epsilon} \rangle_p$  пропорциональна вектору Бюргера,  $b$ , и описывается формулой Орована, для отношения скоростей пластической и упругой деформаций может быть получено сходное с (7) выражение:

$$k'_{\epsilon} \sim (Gb / \Delta\sigma l_d) k_d^{-2}, \quad k_d = L / l_d, \quad (8)$$

В выражении (8) обозначено  $l_d$  – характерная длина дислокационных петель,  $L$  расстояние между дислокациями, так что  $k_d$  – аналог концентрационного параметра. Известно, что параметр  $G b / \Delta\sigma l_d$  определяет самоорганизацию дислокационных ансамблей [19], коллективные процессы реализуются, когда он принимает достаточно большие значения. В сейсмологии аналогичный параметр в (7) может иметь отношение к объяснению появления роев землетрясений вместо обычного ординарного потока событий.

Изложенные теоретические аспекты могут дополнительно аргументировать актуальность анализа спада напряжений для больших выборок событий.

**Результаты расчетов.** Данные о сейсмических моментах, полученные в расчетах в работах [2, 6] представлены в виде графиков на рис.1. Для зоны Южных Курил графики строились для двух выборок: генеральной выборки из всех 263 событий (рис.1 а), и выборки событий с магнитудами  $M \geq 6$  (97 событий, рис.1 б). По количеству событий вторая выборка ближе к случаю зоны северного Тянь - Шаня (85 событий, рис. 1 в).

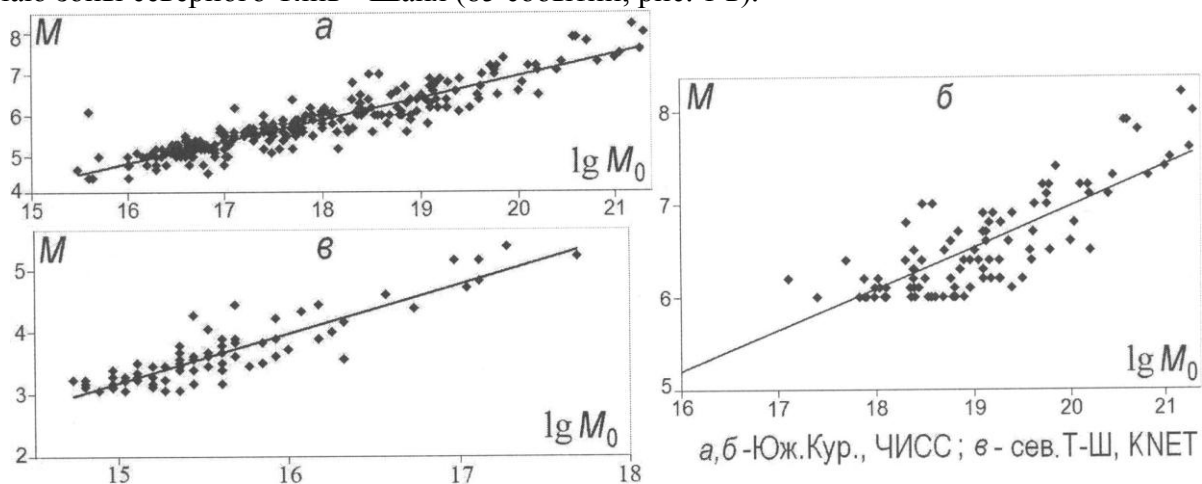


Рис.1. Взаимосвязь локальной магнитуды,  $M$ , и сейсмического момента: а – зона вокруг Южных Курильских о-вов, б - та же зона, но события с  $M \geq 6$ , в – северный Тянь-Шань, сеть КНЕТ. [ $M_0$ ] -Н м.

Во всех трех случаях графики зависимости  $M - \lg M_0$  допускают линейную аппроксимацию. Среднеквадратичное отклонение, СКО, от линейного тренда составляет около 7% в случае первой зоны (рис.1 а) и  $\sim 13\%$  для другой зоны (рис. 1 в). Прореживание числа событий не

меняет точности аппроксимации графика для зоны Южных Курил (рис. 1 б). Выражения линейной аппроксимации (регрессии) графиков  $M - \lg M_0$  можно записать в форме  $M=0.53 \lg M_0 - 3.6$  для Южно-Курильской зоны, и  $M=0.79 \lg M_0 - 8.7$  для северного Тянь-Шаня. Важно, что для случая рис. 1 а, б диапазон изменения сейсмического момента составляет почти 6 порядков, и при этом наличие линейной аппроксимации – нетривиальный результат. Стоит еще отметить следующее. Хотя коэффициенты регрессии получились отличающимися от входящих в (3), разница значений  $M$  с магнитудой Канамори,  $M_w$ , по данным [2] не превышает 0.3.

На рис. 2 а,б,г представлены данные о спаде напряжений в очагах в зависимости от сейсмического момента  $M_0$  для тех же зон, и тех же выборок событий, что и на рис.1. Для графика на рис 2 а (генеральная выборка событий для зоны Южных Курил) дополнительно показан в увеличенном масштабе интервал значений  $M_0$  от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  Н м (рис 2 в). Этот интервал отличается от интервала с более высокими значениями  $M_0$  по распределению точек  $\Delta\sigma$ . Внутри интервала значения спада напряжений группируются около прямой, хотя есть несколько точек с большим отклонением  $\Delta\sigma$  (рис 2 а,в). Тем не менее, на этом интервале возможна линейная аппроксимация зависимости  $\Delta\sigma$  от  $\lg M_0$ :  $\Delta\sigma [\text{МПа}]=0.2 \lg M_0 - 3$ . При  $\lg M_0 > 18$  разброс точек  $\Delta\sigma$  становится больше самих значений спада напряжений, и вряд ли можно говорить о взаимосвязи  $\Delta\sigma$  с сейсмическим моментом  $M_0$ . С учетом вышеотмеченной связи  $M_0$  и магнитуды переходному значению  $\lg M_0 = 18$  соответствует точка  $M \approx 6$ .

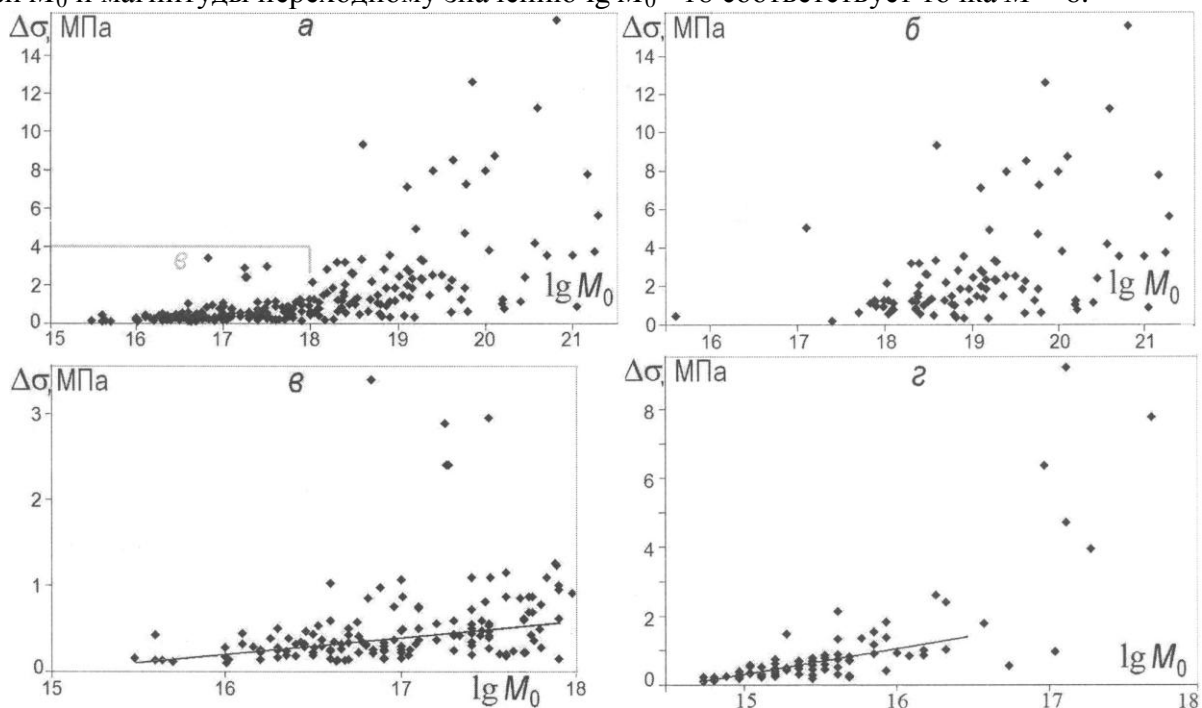


Рис.2. Сопоставление значений спада напряжений в очагах ЗЛТ и логарифма сейсмического момента для зоны Южных Курил: а – график для всех событий, б – для событий с  $M \geq 6$ , в – для событий, у которых  $\lg M_0 \leq 18$ , и для зоны Северного Тянь - Шаня – г. На графике а серой полосой указан интервал, вынесенный на рис 2 в. [ $M_0$ ] - Н м.

У большинства таких событий  $\lg M_0 \geq 18$ . По рис 2 б видно, что распределение  $\Delta\sigma$  имеет облачный характер. При этом близким значениям  $\Delta\sigma$  (например, лежащим в полосе  $\pm 0.2$  МПа) соответствуют более 5 событий с разными точками на оси  $\lg M_0$ . Следовательно, детализация не обнаруживает признаков корреляций (взаимосвязи) динамических параметров  $\Delta\sigma$  и  $M_0$  для

событий с высокими значениями сейсмического момента.

Для зоны северного Тянь - Шаня (рис. 2 г) также можно выделить два интервала на оси  $\lg M_0$ , для которых различается разброс значений  $\Delta\sigma$ . условно разделяются точкой  $\lg M_0 = 16.5$  (т.е.  $M_0 \approx 3 \cdot 10^{16}$  Н м). Этой точке соответствует граница по магнитуде  $M \approx 4.5$ , или  $K \approx 12$  по энергетическому классу Раутиан ( $K = 1.8 M + 4$ ). На интервале меньших моментов  $M_0$  точки  $\Delta\sigma$  ложатся компактно, ход графика  $\Delta\sigma$  можно аппроксимировать выражением:  $\Delta\sigma [\text{МПа}] = 0.78 \lg M_0 - 11.4$ . На интервале  $\lg M_0 \geq 16,5$  точек немного, тем не менее, большой разброс значений  $\Delta\sigma$  может свидетельствовать об отсутствии взаимосвязи с  $M_0$  моментом и магнитудой  $M$ . Таким образом, для двух сейсмоактивных зон Евразии получен результат о наличии интервалов больших сейсмических моментов (или магнитуд) с отсутствием корреляций  $\Delta\sigma$  с этими параметрами. В недавней работе [21] были сделаны аналогичные выводы при анализе сейсмоакустической эмиссии (магнитуды от -4 до -1.5).

На рис.3 и 4 представлены диаграммы распределения по времени величин спада напряжений соответственно для зон Южных Курильских островов и северного Тянь-Шаня. На рисунках отмечены сильнейшие землетрясения (значок Y), и события с наибольшим значением  $\Delta\sigma$ . На обоих рисунках обращает на себя внимание наличие периодов времени с низкими значениями  $\Delta\sigma$ , менее 1 МПа для всей последовательностей событий. Длительность таких периодов 1.5 -2.5 года для зоны Южных Курил и 1-2 года для северного Тянь-Шаня. Периоды с небольшим падением напряжений для всех очагов ЗЛТ чередуются с периодами, включающими события с повышенными значениями  $\Delta\sigma$ . Такое чередование может свидетельствовать, что околопороговое напряженное состояние земной коры (по критерию Кулона - Мора) реализуется регулярно, даже в сейсмоактивных регионах.

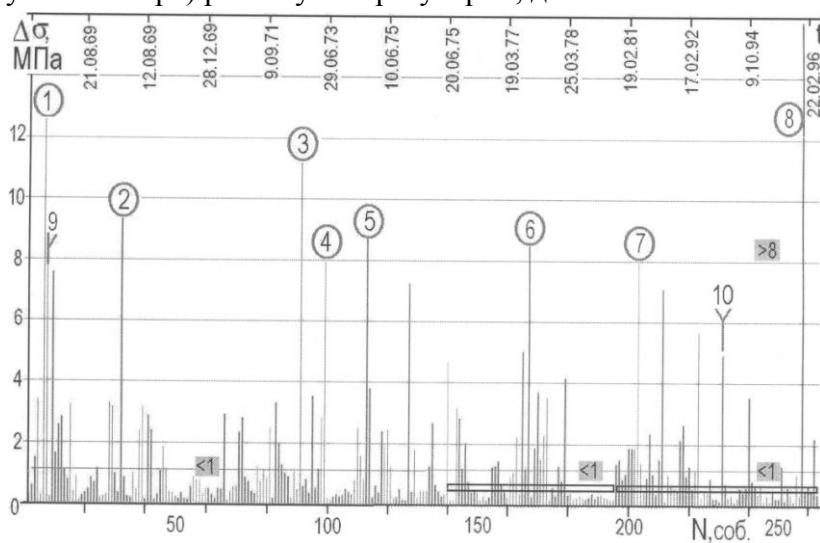


Рис.3. Диаграмма распределения спада напряжений в последовательности событий в Южно-Курильской зоне

ТАБЛИЦА 1. Сведения о событиях, указанных на рис.3

№	Дата	$M$ , [2]	$\lg M_0$	$\Delta\sigma$ , МПа
1	11.08.69	7.4	19.85	12,6
2	15.08.69	6	18.6	9.3
3	17.06.73	7.9	20,6	11.2
4	26.06.73	6.9	19.4	7.9
5	27.09.74	7.2	20.11	8.7
6	22.03.78	7	19.63	8.5
7	3.09.81	6.6	20.0	7.9
8	3.12.95	7.3	20.82	15.8
9	11.8.69	8.2	21.18	7.8
10	4.10.94	8	28,3	5,6

Согласно рис. 3 и табл.1 в Южно-Курильской зоне у всех событий со спадом напряжений 7.8 МПа и выше магнитуды лежат в пределах 6-7.4, хотя в течение исследуемого периода также произошло 6 ЗЛТ с  $M > 7.5$  [2]. Эффективность сильнейших событий в снятии напряжения в очагах оказалась меньше, чем для ЗЛТ с магнитудами 6-7.4. Аналогично, в зоне северного Тянь-Шаня для большинства ЗЛТ со значениями  $\Delta\sigma > 2$  МПа (7 из 8 событий) магнитуды попадают в диапазон умеренных,  $M = 3.6 - 5.5$ , а не сильных событий,  $M > 5.5$ . На рис. 3 и 4 можно заметить примеры того, что события с высокими  $\Delta\sigma$  происходили перед или

после сильнейших ЗЛТ, в частности, в форшоковых и афтершоковых сериях сильнейшего ЗЛТ 11.8.1969, М8.2. А в периоды сплошных низких значений  $\Delta\sigma$  отсутствуют сильные ЗЛТ.

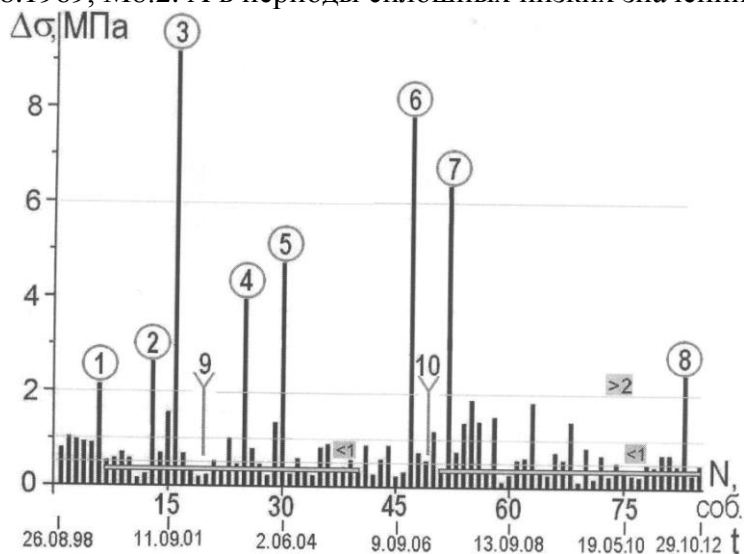


ТАБЛИЦА 2. Даты и параметры событий, указанных на рис.4

№	Дата	$M$ , [6,7]	$\lg M_0$	$\Delta\sigma$ , МПа
1	13.07.99	3.2	15.6	2.1
2	08.07.01	4	16.26	2.6
3	18.11.01	4.8	17.1	9.2
4	16.01.04	5.4	17.28	3.9
5	02.06.04	5.1	17.1	4.7
6	08.11.06	5.2	17.7	7.8
7	06.06.07	5.1	16.97	6.4
8	12.09.12	3.6	16.32	2.4
9	22.05.03	5.7	-	-
10	25.12.06	6	-	-

Рис.4. Диаграмма распределения  $\Delta\sigma$  в очагах ЗЛТ в зоне северного Тянь-Шаня

Для дальнейшего анализа распределений  $\Delta\sigma$  для каждой зоны в каталогах динамических параметров [2,7] были выделены две выборки с равным числом событий, как указано рамками на рис 3, 4. Для этих выборок сопоставлялись относительные доли событий со значениями  $\Delta\sigma$  в заданных диапазонах ( $< 0.6$  МПа,  $< 1$  МПа,  $> 2$  МПа,  $> 8$  МПа и т.п.). Результат сравнения прослеживается прямо по рис. 3: для выборки событий №197-263 (включающей Шикотанское ЗЛТ 4.10.1994) доля событий с малым спадом напряжения,  $\Delta\sigma < 0.6$  МПа, заметно больше, чем для выборки событий №140-196. Для выборок, указанных на рис.4, доля событий с  $\Delta\sigma < 0.6$  МПа составляет 61,5% в случае событий № 7-40 (2000-2005 гг), и 56% для событий №52 -85 (06.2007 – 10.2012). А по генеральной выборке событий этот показатель - 48.5%. Не исключено, что проводимые в северном Тянь - Шане в 2000-2005 гг электроразондирования земной коры с повышенным вкладом энергии [21] отразились в перераспределении  $\Delta\sigma$ , как и разрядка напряжений после ЗЛТ 25.12.2006 с наибольшей магнитудой за период 1998-2012.

## ВЫВОДЫ

Для двух сейсмоактивных регионов Евразии с различными геодинамическими условиями (субдукция и внутриконтинентальный ороген) обнаружены сходные черты в распределениях по времени динамических параметров очагов ЗЛТ: сейсмического момента,  $M_0$ , и спада напряжения,  $\Delta\sigma$ . Показано, что  $\Delta\sigma$  не может описываться монотонной функцией момента  $M_0$  или магнитуды во всем диапазоне изменения  $M_0$ . Спад напряжения является независимым параметром и информативен при анализе изменений сейсмического режима. В связи с этим, целесообразен мониторинг  $\Delta\sigma$  в зонах, где локальная сейсмичность контролируется современными сетями.

Исследование частично поддержано грантами РФФИ №15-05-06857 а, 14-05-00099 а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальметьева З.А., Мельникова Т.А., Мусиенко Е.В., Юдахин Ф.Я. Модели очаговых зон сильных землетрясений. В кн.: Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов. Бишкек: Илим. 1992. С. 124 - 131.
2. Бурымская Р.Н. Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969-1996 годы.//Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных

землетрясений Северо- Запада Тихого океана/ Отв.ред. А.И. Ивашенко. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т.1. С. 48 – 67.

3. **Ключевский А.В., Демьянович В.М.** Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли. 2002. №2. С.55-66.
4. **Dziewonski А.М., Chou Т.А., and J.H. Woodhouse J.H.** Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity // J. Geophys. Res. No.86. 1981. P. 2825 - 2852.
5. **Горбунова И.В., Кальметьева З.А.** Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Бишкек: Илим. 1988. 127 с.
6. **Сычева Н.А. Богомолов Л.М.** Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // Физика Земли 2014 №3. С. 142 - 153.
7. **Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н.** Исследование динамических параметров землетрясений Северного Тянь-Шаня // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Тез. докл. 6-го Междунар. симпозиума. 23-29 июня 2014, г Бишкек: ИС РАН. С. 429-432.
8. **Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А.** Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET). // Физика Земли. 2005. №11. С. 62-78.
9. **Запольский К.К.** О механизме землетрясения как процесса очагового разрыва потданным частотно-временной сейсмометрии // Достижения и проблемы современной геофизики. М., 1984. С.124 -135.
10. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука.1975. 175 с.
11. **Ризниченко Ю. В.** Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С.9-27.
12. **Brune J.N.** Seismic moment, seismicity and rate of slip along major fault zones // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. No 2. P. 717 - 791.
13. **Brune J.N.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997-5009.
14. **Madariaga R.** High frequency radiation from dynamic earthquake fault models// Ann. Geophys. 1983. V.L. P.17-23.
15. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др.** Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. №2. С. 66-79.
16. **Oth A., Bindi D., Parolai S., Giacomo D.** Spectral Analysis of K-NET and KiK-net Data in Japan, PartII: On Attenuation Characteristics, Source Spectra, and Site Response of Borehole and Surface Stations // Bull. Seismol. Soc. of America. 2011. Vol. 101. No. 2. P. 667-687. Doi:10.1785/0120100135.
17. **Юнга С.Л.** Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука.1990.191 с.
18. **Завьялов А.Д.** Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
19. **Орлов А.Н.** Введение в теорию дефектов в кристаллах: учебное пособие для вузов. М.: Металлургия.1983. 144 с.
20. **Kwiatek G., Plenkens K., Dresen G.** Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations //Bull. Seismol. Soc. of America.2011, Vol.101. No 6. P. 2592-2608. DOI: 10.1785/0120110094.
21. **Сычев В. Н., Богомолов Л.М., Зейгарник В. А. и др.** О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / отв. ред. В.М. Опарин. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. С. 134 - 141.