

Baisch, S., R. Vörös, E. Rothert, H. Stang, R. Jung, and R. Schellschmidt. A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3), 405–413, doi:10.1016/j.ijrmms.2009.10.001.

McClure, M. Modeling and Characterization of Hydraulic Stimulation and Induced Seismicity in Geothermal and Shale Gas Reservoirs // Stanford University, California, 2012. P. 369.

McGarr A., Simpson D., Seeber L. Case Histories of Induced and Triggered Seismicity // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology (edited by W.H.K. Lee and H. Kanamori), Academic Press. 2002, v. 81A, pp. 647–660.

Shelbu L.P., Richard D.M., John Intfen, Tandis Bidgoli, Rex Buchman A geologically-based approach to mitigate potentially induced seismicity in Kansas // SEG Expanded Abstracts, 2015. P. 4871–4876.

Simpson D.W. Triggered Earthquakes // Annu. Rev. Earth and Planet. Sciences, Paolo Alto, Calif. 1986, v. 14, p. 21–42.

УДК 531.382+550.34

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПАДА НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОЯВЛЕНИЯ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

*Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева, А.С. Закупин,
П.А. Каменев, В.Н. Сычев*

ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск

При статистическом анализе каталогов динамических параметров очагов землетрясений для двух сейсмоактивных регионов (Южные Курильские острова и северный Тянь-Шань) выявлено 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. Обращено внимание, что корреляции между $\Delta\sigma$ и сейсмическим моментом M_0 имеют место для событий с ограниченными значениями M_0 , или магнитуды.

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 такого описания необходим статистически значимый набор данных – достаточно большое число ЗЛТ, для которых определены динамические параметры (ДП) очагов. По сложившейся мировой практике ДП: радиус Брюна – r , скалярный сейсмический момент – M_0 , и падение напряжения – $\Delta\sigma$, определяются, в основном, для сильных ЗЛТ [Горбунова, Кальметьева, 1988; Dziewonski et al., 1981]. При этом составление каталога ДП для компактной

территории было возможно лишь для регионов с наиболее высокой сейсмической активностью. Важным примером является территория северо-восточной части Тихого Океана (в пределах $42\text{--}51^\circ$ с.ш., $140\text{--}159^\circ$ в.д.), для которой в работе [Бурымская, 2001] представлен каталог ДП 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 ДП. В настоящей работе при анализе этого каталога внимание сосредоточено на области вокруг Южных Курильских островов, ограниченной координатами $42\text{--}46^\circ$ с.ш., $144\text{--}151^\circ$ в.д. В эту зону попадает наибольшая часть событий из каталога Бурымской (263 из 430). Зона Южных Курил выделяется своим наиболее высоким уровнем сейсмичности (даже на фоне всего сейсмоактивного региона). Интерес к ней также обусловлен произошедшим там Шикотанским ЗЛТ (4.10.1994), $M_w = 8,3$ – одним из сильнейших сейсмических событий в мире в конце XX века.

Возможность и целесообразность расширения количества решений ДП за счет обработки записей среднемагнитудных ЗЛТ была продемонстрирована на примере другого сейсмоактивного региона – северного Тянь-Шаня [Сычева, Богомолов, 2014]. Для этого региона в работе [Сычева и др., 2014] по данным телеметрической KNET составлен каталог динамических параметров ЗЛТ, произошедших в период 1998–2012 гг. Каталог содержит 85 событий с магнитудой 3–5 (энергетический класс $K = 9,5\text{--}13,7$), что составляет 86% от общего числа событий (99) этого класса за исследуемый период. Такая статистика позволяет говорить о массовом определении величин r , M_0 , и $\Delta\sigma$. Представляет интерес сопоставить распределения спада напряжений по каталогу [Бурымская, 2001] для зоны Южно-Курильских островов (в пределах $42\text{--}46^\circ$ с.ш., $144\text{--}151^\circ$ в.д.) и зоны Северного Тянь-Шаня внутри области ($41\text{--}43^\circ$ с.ш., $73\text{--}77^\circ$ в.д., контролируемой сетью KNET. Важно отметить методические различия при расчетах ДП в этих зонах. В первом случае расчет динамических параметров очагов ЗЛТ проводился по записям аналоговых сейсмостанций в соответствии с методическими рекомендациями того времени [Запольский, 1984]. При этом спектральные параметры определялись непосредственно по записям станций (так называемые станционные ЧИСС спектры). Во втором случае при обработке сейсмограмм цифровых станций KNET применена современная методика расчета ДП, включающая классический подход к нахождению спектральных параметров [Костров, 1975; Brune, 1970] и отработанные методы перехода от станционного спектра к очаговому [Oth et al., 2011]. При расчетах динамических параметров очагов ЗЛТ на территории северного Тянь-Шаня принимались следующие значения плотности, скорости поперечных волн и модуля сдвига: $\rho = 2600$ кг/м³, $V_s = 3,5$ км/с, $G = 2 \cdot 10^{10}$ Н/м² [Сычева и др., 2014]. Эти значения не отличаются существенно от соответствующих параметров в работе [Бурымская, 2001] для территории Тихоокеанского северо-востока. Ниже будет показано, что, несмотря на методические различия, результаты расчетов распределений спада напряжений в очагах для двух разных регионов обнаруживают сходные черты.

Теоретические основы и соотношения

Расчет радиуса очага, скалярного сейсмического момента, и падения напряжения проводится с использованием выражений, вытекающих из известной модели мгновенного смещения на некоторую величину D вдоль поверхности разрыва [Brune, 1970]. 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 [Костров, 1975]. Размер очага (или, радиус Брюна, $r = r$) определяется формулой $r = 2,34V_s/2\pi f_0$, где V_s – скорость поперечных волн, f_0 – угловая частота, определяемая по изменению линейного тренда спектральной плотности сейсмограмм. При применении формулы Брюна обычно считается, что зона очага – сферическая, и смещение происходит одновременно по всей плоскости разрыва – круговой зоне с радиусом r и площадью $S = \pi r^2$. При этом скалярный сейсмический момент описывается произведением $M_0 = G \cdot S \cdot D$ (G – модуль сдвига по месту очага, D – смещение берегов).

Выражение для расчета скалярного момента по низкочастотному пределу спектральной плотности смещения Ω_0 (или, кратко, НЧ амплитудой) вытекает из решений волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмических волн и записывается в форме, [Ризниченко, 1976]: $M_0 = 4\pi\rho R V_s^3 \Omega_0 / \Psi_0$, где ρ – плотность пород в области очага, R – гипоцентрального расстояние, Ψ_0 – фактор направленности излучения из очага (среднее значение которого принимается равным 0,64 [Ризниченко, 1976]). Стоит отметить, что приведенная формула справедлива для любых расстояний от источника, превышающих характерную длину волны. Однако наибольшая точность определения Ω_0 получается для относительно небольших расстояний R , когда значения ρ , V_s , в самом очаге и в референтной точке можно считать одинаковыми. Ввиду независимости выражения для M_0 от радиуса очага и наличием взаимосвязи с моментной магнитудой M_w (по формуле Канамори $M_w = 2/3 \lg M_0 - 10,7$) 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 $\Delta\sigma = 7 M_0/16r^3$ [Brune, 1970]. Величина $\Delta\sigma$ может также быть выражена через угловую частоту f_0

$$\Delta\sigma = 8,5 M_0 f_0^3 / V_s^3 \quad (1)$$

В ряде работ (обзор в [Кочарян, 2014]) вместе с параметрами M_0 , $\Delta\sigma$ также рассматривается приведенная сейсмическая энергия E_s/M_0 . В случае несферического очага с шириной $w \ll r$ («длинного» размера), это отношение может быть выражено через геометрические параметры w , r и смещение D :

$$E_s/M_0 \cong 0.1 w D / r^2.$$

При модификации модели Брюна в формуле (1) скорость V_s заменяется скоростью разрыва, V_R , и переопределяется f_0 (роль «частоты среза» переходит к параметру аппроксимации спада спектральной плотности). В работе [Madariaga, 2011] получено соотношение

$$E_s/M_0 = 2(D/r) V_R^3 / V_s^3,$$

указывающее на возможность выбора нескольких (двух или трех) ДП, через которые выражаются все остальные параметры очага. В данной работе удобно выбрать M_0 , и $\Delta\sigma$ в качестве основных динамических параметров.

При сопоставлении изменений деформации в очаге с окружающей зоной (или с усредненной деформацией) возникает необходимость в дополнительных параметрах. Наиболее известен концентрационный параметр $k_{II} = R_{CR}/r$, описывающий соотношение размера очага и среднего расстояния между сейсмогенными разрывами, R_{CR} [Завьялов, 2006]. Покажем, что отношение скоростей псевдопластической и упругой деформаций (безразмерный параметр) также информативно. В земной коре роль псевдопластической деформации играет сейсмотектоническая деформация (СТД) [Юнга,

1990]. Известно, что наибольший вклад в СТД вносят крупномagnitudeные события. При выборе сравнительно небольших интервалов ΔT учет даже одного такого события (номер α) позволяет оценить скорость этой деформации

$$\langle \dot{\epsilon} \rangle_{\text{STD}} = (GV \Delta T)^{-1} M_0^\alpha m_{ij}^\alpha \quad (2)$$

В выражении (2) через V обозначен выбранный объем, m_{ij} – единичный тензор момента очага [Юнга, 1990] (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

$$\langle \dot{\epsilon} \rangle_E = \Delta \sigma / (G \Delta T) \quad (3)$$

Отношение скоростей деформаций (2) и (3) можно преобразовать к форме

$$k_\epsilon = \langle \dot{\epsilon}_{ij} \rangle_{\text{STD}} / \langle \dot{\epsilon} \rangle_E \sim (G/\Delta \sigma) r^2 D/R^3 \quad (4)$$

Выражение в правой части (4) становится более наглядным при выборе в качестве характерного размера R среднего расстояния между сейсмогенными разрывами R_{CR} [Завьялов, 2006], то есть, когда деформации сравниваются в зоне, ненарушенной вплоть до последнего ЗЛТ.

$$k_\epsilon \sim (G/\Delta \sigma) (D/r) k_{\text{II}}^{-3} \quad (5)$$

В выражении (5) первый множитель – фактор спада напряжений, он имеет большую величину, второй (геометрический фактор) очень мал, величина k_{II} превышает критическое значение $\sim (5-10)$ [Завьялов, 2006]. Это выражение отражает очевидное обстоятельство, что при малых $\Delta \sigma$ роль псевдопластических деформаций возрастает, и (5) позволяет делать оценки для разных интервалов времени. В сейсмологии параметр в (5) может иметь отношение к объяснению появления роев землетрясений.

Результаты и обсуждение

Данные о сейсмических моментах, полученные в расчетах в работах [Бурымская, 2001; Сычева и др., 2014] представлены в виде графиков на рис. 1. Графики зависимости $M - \lg M_0$ допускают линейную аппроксимацию (регрессию): для Южно-Курильской зоны (рис. 1, а)

$$M = 0.53 \lg M_0 - 3.6, \text{ и } M = 0.79 \lg M_0 - 8.7$$

для северного Тянь-Шаня (рис. 1, б). В первом случае среднеквадратичное отклонение (СКО) от линейного тренда составляет около 7%, а во втором $\sim 13\%$. Важно, что для первой зоны диапазон изменения M_0 составляет почти шесть порядков, и при этом весьма нетривиально наличие линейной регрессии. Стоит еще отметить, несмотря на отличие полученных коэффициентов регрессии от формулы Канамори, разница в оценках магнитуд по данным [Бурымская, 2001] при расчетах по разным формулам не превышает 0,3.

На рис. 2 представлены данные о спаде напряжений в очагах в зависимости от сейсмического момента M_0 для тех же зон, что и на рис. 1. Для графика на рис. 2,

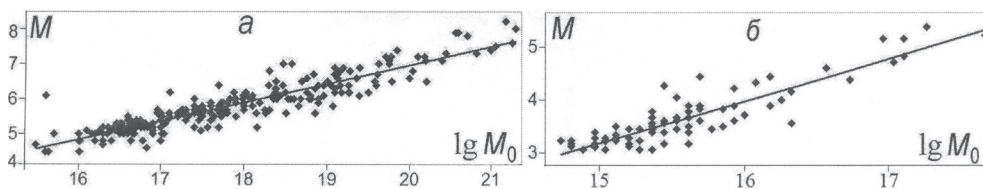


Рис. 1. Взаимосвязь локальной магнитуды, M , и сейсмического момента: a – зона вокруг Южных Курильских о-вов, b – северный Тянь-Шань, сеть KNET ($[M_0]$ Н м)

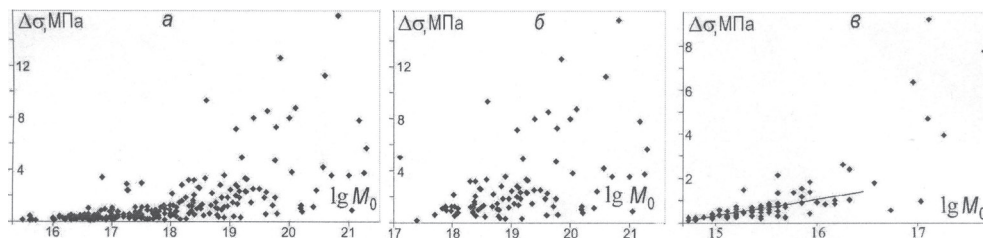


Рис. 2. Сопоставление значений спада напряжений в очагах ЗЛТ и логарифма сейсмического момента для зоны Южных Курил: a – график для всех событий, b – для событий с $M \geq 6$, c – для зоны Северного Тянь-Шаня ($[M_0]$ Н м)

a (генеральная выборка событий для зоны Южных Курил) выделяется два интервала значений $\lg M_0$, на которых распределение точек $\Delta\sigma$ различно: от 10^{15} до 10^{18} Н·м. В интервале с $\lg M_0 < 18$ значения $\Delta\sigma$ около прямой, хотя есть несколько точек с большим отклонением (рис. 2, a). 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 $M \approx 6$. На рис. 2, b показано распределение $\Delta\sigma$ для выборки событий с магнитудами не менее 6. Видно, что это распределение имеет облачный характер, причем 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, c) также можно выделить два интервала на оси $\lg M_0$, для которых различается разброс значений $\Delta\sigma$. Интервалы условно разделяются точкой $\lg M_0 = 16,5$ (то есть $M_0 \approx 3 \cdot 10^{16}$ 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 $\Delta\sigma$ отражает отсутствие взаимосвязи с M_0 моментом и магнитудой M . Таким образом, для двух сейсмоактивных зон Евразии выявлено наличие интервалов больших моментов M_0 (или магнитуд) с отсутствием корреляций $\Delta\sigma$ с этими параметрами. Аналогичные выводы были сделаны в работе [Kwiatek et al., 2011] при анализе сейсмоакустической эмиссии ($-4 < M < -1,5$).

Для зоны Южных Курил также проведен расчет приведенной сейсмической энергии, $e_{\text{пр}} = E_s/M_0$, где подразумевается, что выделившаяся сейсмическая энергия, E_s , вычислена методом интегрирования спектральной плотности мощности (так называемая спектральная энергия). Для сети аналоговых станций в работе [Бурымская, 2001] определена именно спектральная энергия, причем величина E_s согласуется с магнитудными оценками энергии ЗЛТ. Известно, что $e_{\text{пр}}$ обычно принимает весьма малые значения, менее 10^{-3} [Кочарян, 2014]. С учетом этого более нагляден логарифмический график зависимости $e_{\text{пр}}$ от сейсмического момента (см. рис. 3). В отличие от случая с $\Delta\sigma$ большой разброс значений $e_{\text{пр}}$ для заданного узкого диапазона δM_0 наблюдается в интервале низких моментов, $M_0 < 10^{17}$ Н м. График на рис. 3 описывает более быстрый рост $e_{\text{пр}}$ с увеличением M_0 по сравнению с обобщением $E_s/M_0 \sim (M_0)^{0,04}$ [Кочарян, 2014], но такой рост согласуется с данными по Японии, которые приведены в той же работе: $E_s/M_0 \sim (M_0)^{0,47}$.

На рис. 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 $\Delta\sigma$, менее 1 МПа для всей последовательно-

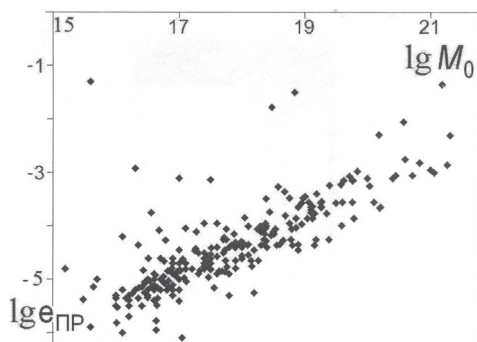


Рис. 3. Взаимосвязь приведенной сейсмической энергии, $e_{\text{пр}} = E_s/M_0$, и сейсмического момента, для землетрясений в зоне Южных Курил.

Линейная аппроксимация графика: $\lg e_{\text{пр}} = 0,57 \lg M_0 - 14,6$ ($[M_0]$ Н м). Максимальные значения $e_{\text{пр}} \sim 10^{-3}$ характерны для сильнейших ЗЛТ

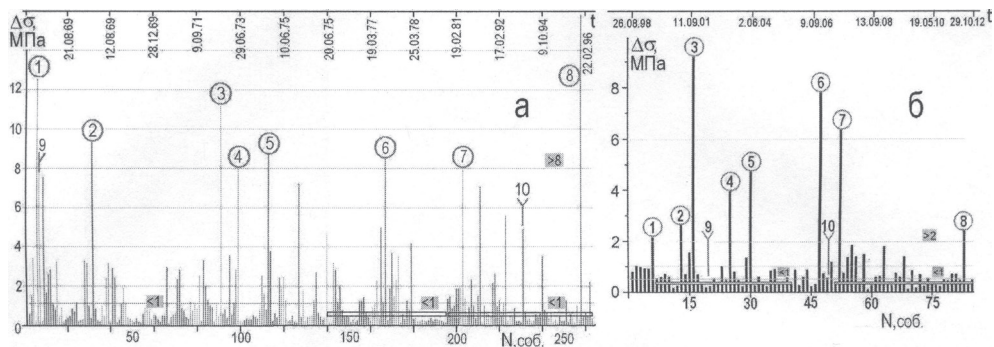


Рис. 4. Диаграмма распределения спада напряжений в очагах в последовательности ЗЛТ: а – в Южно-Курильской зоне, б – в зоне северного Тянь-Шаня

сти 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 означать, что околопороговое напряженное состояние земной коры (по критерию Кулона-Мора) регулярно реализуется в сейсмоактивных регионах.

Согласно рис. 4 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 $M > 7,5$ [Бурымская, 2001]. 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. 4 можно заметить, что события с высокими $\Delta\sigma$ происходили перед или после сильнейших ЗЛТ, в частности, в форшоковых и афтершоковых сериях сильнейшего ЗЛТ (11.8.1969), $M 8,2$. А в периоды сплошных низких значений ?

Таблица

Сведения о событиях, указанных на рис. 4

Южные Курильские острова [Бурымская, 2001]					Северный Тянь-Шань [Сычева и др., 2014]				
№	Дата	M	Lg M ₀	$\Delta\sigma$, МПа	№	Дата	M, [2]	lg M ₀	$\Delta\sigma$, МПа
1	13.07.99	3,2	15,6	2,1	1	11.08.69	7,4	19,85	12,6
2	08.07.01	4	16,26	2,6	2	15.08.69	6	18,6	9,3
3	18.11.01	4,8	17,1	9,2	3	17.06.73	7,9	20,6	11,2
4	16.01.04	5,4	17,28	3,9	4	26.06.73	6,9	19,4	7,9
5	02.06.04	5,1	17,1	4,7	5	27.09.74	7,2	20,11	8,7
6	08.11.06	5,2	17,7	7,8	6	22.03.78	7	19,63	8,5
7	06.06.07	5,1	16,97	6,4	7	3.09.81	6,6	20,0	7,9
8	12.09.12	3,6	16,32	2,4	8	3.12.95	7,3	20,82	15,8
9	22.05.03	5,7	17,04	–	9	11.8.69	8,2	21,18	7,8
10	25.12.06	6	17,12	–	10	4.10.94	8	28,3	5,6

Для дальнейшего анализа распределений $\Delta\sigma$ для каждой зоны в каталогах динамических параметров [Бурымская, 2001; 7] были выделены две выборки с равным числом событий, как указано рамками на рис. 4, а, б. Для этих выборок сопоставлялись относительные доли событий со значениями $\Delta\sigma$ в заданных диапазонах (менее 0,6 МПа, или 1 МПа, более 2 МПа, или 8 МПа...). Результат сравнения прослеживается прямо по рис. 4, а: 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, б, 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 гг.). А по генеральной выборке событий этот показатель – 48,5%. Важно отметить, что разделение ин-

тервалов выбрано так, чтобы дата Кочкорского ЗЛТ (25.12.2006), $K = 14,8$ (самое сильнейшее событие на Тянь-Шане) не попала ни в один интервал. Рост абсолютного и относительного чисел событий с низкими $\Delta\sigma$ в период 2000–2005 гг. естественно связывать с электророндированиями земной коры с повышенным вкладом энергии, которые проводились в северном Тянь-Шане в этот период [Сычев и др., 2010]. Для подтверждения этой гипотезы можно рассмотреть подвыборку событий классов $K \geq 10$, включающую 54 из 85 событий с решениями для ДП. Известно, что для диапазона $12 \geq K \geq 10$ влияние зондирований коры импульсами тока было обнаружено даже при небольшой статистике (по перераспределению таких событий по времени после воздействия и появлением бимодальности, [Сычев и др., 2010]). Для «генеральной» подвыборки (54 события) на случай $\Delta\sigma < 0,6$ МПа приходится 37,5%; в период 2000–2005 гг., когда проводились электророндирования, доля событий с низким $\Delta\sigma$ составляет 50%, а в период сравнения, 2007–2012 гг. – 33%. Число событий в обеих подвыборках одинаково – 24. Таким образом, различие доли событий с небольшим спадом напряжения становится более контрастным, что может считаться оправданием гипотезы.

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 напряжений является независимым параметром, а информация о временных зависимостях $\Delta\sigma$ важна для оценки сейсмического режима, и, в частности, его изменений под влиянием физических полей. В связи с этим, целесообразен мониторинг $\Delta\sigma$ в зонах, где локальная сейсмичность контролируется современными сетями.

Исследование частично поддержано РФФИ (гранты №15-05-06857а, 15-05-00499).

Литература

Бурьянская 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 / Ред. А.И. Иващенко. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т. 1. С. 48–67.

Горбунова И.В., Кальметьева З.А. Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Бишкек: Илим. 1988. 127 с.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.

Запольский К.К. О механизме землетрясения как процесса очагового разрыва по данным частотно-временной сейсмометрии // Достижения и проблемы современной геофизики. М., 1984. С. 124–135.

Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука. 1975. 175 с.

Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сейсотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 353–385. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0133>.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.

Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона / Триггерные эффекты в геосистемах: Матер. Всероссийского семинара совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М: ГЕОС. 2010. С. 316–325.

Сычева Н.А. Богомолов Л.М. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2014. № 3. С. 142–153.

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.

Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсотектонических деформаций. М.: Наука. 1990. 191 с.

Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.

Dziewonski A.M., Chou T.A., 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.

Kwiatak G., Plenkers 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.

Madariaga R. Earthquake Scaling laws // Extreme environmental events: complexity in forecasting and early warning. (R.A. Meyers, Ed.). V. 1. Springer. 2011. P. 364–383.

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.

УДК 551.466+550.344

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОГЕННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Н.П. Булатова

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва
(n.p.bulatova@mail.ru)

Для исследования влияния экзогенных источников как триггерное инициирование сильных землетрясений и др. процессов внутри Земли, автором были изу-