

О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии

Найля Абдуллоевна Сычева¹, Леонид Михайлович Богомолов*²

¹ Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, Киргизия

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: bleom@mail.ru

[Резюме PDF RUS](#)

[Abstract PDF ENG](#)

[Полный текст PDF RUS & ENG](#)

Резюме. Обобщены данные о сброшенных напряжениях и приведенной сейсмической энергии для землетрясений Северной Евразии. Анализируются взаимосвязи этих параметров с сейсмическим моментом и магнитудой. Проведены детализационные исследования для Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона), получены значения динамических параметров очагов для 183 землетрясений разных энергетических классов ($K = 8.7–14.8$): угловой частоты, параметра спектральной плотности, скалярного сейсмического момента, радиуса очага, уровня сброшенных напряжений, сейсмической энергии и приведенной сейсмической энергии. Для расчета радиуса очага и сброшенных напряжений использованы две модели – подход Брюна и улучшенная модель Мадариаги–Канеко–Ширера. Для относительно слабых событий установлена степенная зависимость (регрессия) сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента M_0 , что согласуется с результатами о степенной зависимости от M_0 приведенной сейсмической энергии в ряде других регионов Северной Евразии. Отмечена связь между видом очаговой подвижки и уровнем сброса напряжений.

Ключевые слова

очаг землетрясения, магнитуда, сейсмический момент, сброс напряжений, приведенная сейсмическая энергия, масштабные зависимости

Для цитирования: Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 393–446. (На рус. и англ. яз.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>

For citation: Sycheva N.A., Bogomolov L.M. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 393–446. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>

Список литературы (84 библиогр. назв.)

1. Аки К., Ричардс П. **1983.** *Количественная сейсмология. Теория и методы.* Т. 1–2. М.: Мир, 880 с.
2. Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. **2015.** Влияние деформационных характеристик нарушений сплошности породного массива на эффективность излучения очагов индуцированной сейсмичности. Ч. I. Результаты натурных наблюдений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 4: 83–95.
3. Богомолов Л.М., Сычева Н.А., Закупин А.С., Каменев П.А., Сычев В.Н. **2015.** Распределение спада напряжений в очагах землетрясений и проявления триггерных эффектов. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы Третьего Всероссийского семинара-совещания.* ИДГ РАН. М.: ГЕОС, с. 48–56.
4. Богомолов Л.М. **2013.** Поиск новых подходов к объяснению механизмов взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов. *Вестник ДВО РАН*, 3: 12–18.
5. Бурымская Р.Н. **2001.** Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана.* А.И. Иващенко (отв. ред.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 1: 48–67.
6. Добрынина А.А. **2009.** Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны. *Физика Земли*, 12: 60–75.
7. Кейлис-Борок В.И., Писаренко В.Ф., Соловьев С.Л. и др. **1979.** Массовое определение механизмов очагов землетрясений на ЭВМ. В кн.: *Теория и анализ сейсмологических наблюдений.* М.: Наука, 45–59. (Вычислительная сейсмология; вып. 12).
8. Костров Б.В. **1975.** *Механика очага тектонического землетрясения.* М.: Наука, 175 с.
9. Кочарян Г.Г. **2012.** Об излучательной эффективности землетрясений (пример геомеханической интерпретации результатов сейсмологических наблюдений). *Динамические процессы в геосферах*, 3: 36–47.
10. Кочарян Г.Г. **2014.** Масштабный эффект в сейсмотектонике. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2): 353–385.
11. Кочарян Г.Г. **2016.** *Геомеханика разломов.* М.: ГЕОС, 424 с.
12. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. **2013.** Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем. *Физическая мезомеханика*, 16(5): 5–15.

13. Кочарян Г.Г., Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б. **2016**. Энергия, излучаемая сейсмическими событиями различного масштаба и генезиса. *Физика Земли*, 4: 141–156. doi:10.7868/S0002333716040037
14. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. **1988**. *Теоретическая физика: учеб. пособие*. Т. 6: Гидродинамика. 4-е изд. М.: Наука, 736 с.
15. Лукк А.А., Юнга С.Л. **1979**. Сейсмоструктурная деформация Гармского района. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 10: 24–43.
16. Маловичко А.А., Маловичко Д.А. **2010**. Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий. В кн.: *Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. Новосибирск, т. 2, 66–92.
17. Москвина А.Г. **1969а**. Поле смещения упругих волн, создаваемое распространяющейся дислокацией. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 6: 3–10.
18. Москвина А.Г. **1969б**. Исследование полей смещения упругих волн в зависимости от характеристик очага землетрясения. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 9: 3–16.
19. Пустовитенко Б.Г., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А. **2013**. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по сейсмическим станциям. *Геофизический журнал*, 5: 172–186.
20. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. **1991**. Очаговые спектры землетрясений. В кн.: *Землетрясения и процессы их подготовки*. М.: Наука, 82–93.
21. Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. **2016**. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(6): 1225–1250.
22. Ризниченко Ю.В. **1985**. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 408 с.
23. Родкин М.В. **2001а**. Проблема физики очага землетрясения: противоречия и модели. *Физика Земли*, 8: 42–52.
24. Родкин М.В. **2001б**. Статистика кажущихся напряжений и проблема природы очага землетрясений. *Физика Земли*, 8: 53–63.
25. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. **2010**. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Третьего Всерос. семинара-совещ., Москва, 22–24 июня 2010 года*. М.: ГЕОС, 316–326.
26. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Сычева Н.А. **2012**. К вопросу о статистической достоверности сейсмического отклика при экспериментальных зондированиях коры Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: *Пятый Международный симпозиум, 19–24 июня, 2011 года. «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных ороенов»: материалы докл.* Бишкек, т. 1: 273–280.
27. Сычева Н.А. **2016**. Киргизская сейсмологическая сеть KNET. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*, 16 (5): 175–183.
28. Сычева Н.А. **2020**. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 178–209. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.178-191.192-209>
29. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2014**. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане. *Физика Земли*, 3: 142–153.
30. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2016**. Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(11): 2071–2083. doi:10.15372/GiG20161109
31. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. **2017**. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 809–825.
32. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадеева В.А. **2005**. Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET). *Физика Земли*, 11: 62–78.
33. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Костюк А.Д. **2009**. Интенсивность сейсмоструктурных деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня). *Геофизические исследования*, 10(2): 37–46.
34. Чедия О.К. **1986**. *Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня*. Фрунзе: Илим, 315 с.
35. Юнга С.Л. **1990**. *Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций*. М.: Наука, 191 с.
36. Abercrombie R.E., Leary P. **1993**. Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass Southern California: implications for earthquake scaling. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1511–1514.
37. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005**. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical J. International*, 162: 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
38. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009**. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. <https://doi.org/10.1029/2008JB005821>
39. Baltay A., Ide S., Prieto G., Beroza G. **2011**. Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, 38(6). <https://doi.org/10.1029/2011GL046698>
40. Boatwright J. **1980**. Spectral theory for circular seismic sources: Simple estimates of source dimension dynamic stress drop and radiated energy. *Bull. of the Seismological Society of America*, 70: 1–28.
41. Bogomolov L.M., Avagimov A.A., Sycheva N.A., Bragin V.D. et al. **2003**. On the interrelation between weak seismicity and sounding electric impacts at Bishkek geodynamic testing place. In: *Problems of destructure earthquake disaster prevention*. Almaty-Evero, p. 175–183.
42. Boore D.M. **2003**. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3): 635–676. <https://doi.org/10.1007/pl00012553>
43. Brune J.N. **1970**. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
44. Brune J.N. **1971**. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76(20): 5002. <https://doi.org/10.1029/jb076i020p05002>
45. Candela T., Renard F., Bouchon M., Schmittbuhl J., Brodsky E.E. **2011**. Stress drop during earthquakes: effect of fault roughness scaling. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(5): 2369–2387. doi:10.1785/0120100298
46. Choy G.L., Boatwright J.L. **1995**. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9): 18205–18228. <https://doi.org/10.1029/95jb01969>
47. Choy G.L., McGarr A., Kirby S.H., Boatwright J. **2006**. An overview of the global variability in radiated energy and apparent stress. In: *Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting*. AGU, p. 43–57. <https://doi.org/10.1029/170gm06>

48. Cotton F., Archuleta R., Causse M. **2013**. What is sigma of the stress drop? *Seismological Research Letters*, 84(1): 42–48. <https://doi.org/10.1785/0220120087>
49. Domański B., Gibowicz S. **2008**. Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland. *Acta Geophysica*, 56: 324–343. doi:10.2478/s11600-008-0014-1
50. Eshelby J.D. **1957**. The determination of elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A241(1226): 376–396. <https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
51. Fehler M.C., Phillips W.S. **1991**. Simultaneous inversion for Q and source parameters of microearthquakes accompanying hydraulic fracturing in granitic rock. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81(2): 553–575.
52. Gibowicz S.J., Kijko A. **1994**. *An introduction to mining seismology*. San Diego: Academic Press, 399 p.
53. Gibowicz S., Young R., Talebi S., Rawlence D. **1991**. Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81: 1157–1182.
54. Hanks T., Kanamori H. **1979**. A moment magnitude scale. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 84: 2348–2350.
55. Hua W., Chen Z., Zheng S. **2013**. Source parameters and scaling relations for reservoir induced seismicity in the Longtan reservoir area. *Pure and Applied Geophysics*, 170(5): 767–783.
56. Ide S., Beroza G.C., Prejean S.G., Ellsworth W.L. **2003**. Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5): 2271. doi:10.1029/2001JB001617
57. Kanamori H. **1977**. The Energy Release in Great Earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987. <https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981>
58. Kaneko Y., Shearer P.M. **2014**. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophysical J. International*, 197(2): 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>
59. Kwiatek G., Ben-Zion Y. **2013**. Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3630–3641. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50274>
60. Kwiatek G., Plenkens K., Dresen G. et al. **2011**. Source parameters of picoseismicity recorded at mponeng deep gold mine, South Africa: implications for scaling relations. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(6): 2592–2608. <https://doi.org/10.1785/0120110094>
61. Lancieri M., Madariaga R., Bonilla F. **2012**. Spectral scaling of the aftershocks of the Tocopilla 2007 earthquake in northern Chile. *Geophysical J. International*, 189: 469–480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05327.x>
62. Ling R.F. **1972**. On the theory and construction of k-clusters. *The Computer J.*, 15(4): 326–332. doi:10.1093/comjnl/15.4.326
63. Madariaga R. **1976**. Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.
64. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
65. Madariaga R. **2011**. Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers, ed. *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning*. Springer, p. 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22
66. McGarr A. **1993**. Factors influencing the strong ground motion from mining-induced tremors. In: R.P. Young, ed. *Rockbursts and seismicity in mines*. Rotterdam, p. 3–12.
67. McGarr A. **1994**. Some comparisons between mining-induced and laboratory earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 142: 467–489.
68. Mori J., Abercrombie R.E., Kanamori H. **2003**. Stress drops and radiated energies of aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake. *J. of Geophysical Research*, 108(B11): 2545–2556. <https://doi.org/10.1029/2001jb000474>
69. Oth A., Parolai S., Bindi D., Wenz F. **2009**. Source spectra and site response from S-waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, earthquakes. *Bull. of the Seismological Society of America*, 99(1): 235–254. <https://doi.org/10.1785/0120080059>
70. Oye V., Bungum H., Roth M. **2005**. Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi Ore Mine, Finland. *Bull. of the Seismological Society of America*, 95(3): 1011–1026. <http://dx.doi.org/10.1785/0120040170>
71. Pacor F., Spallarossa D., Oth A., Luzi L., Puglia R., Cantore L., Mercuri A., D'Amico M., Bindi D. **2016**. Spectral models for ground motion prediction in the L'Aquila region (central Italy): evidence for stress-drop dependence on magnitude and depth. *Geophysical J. International*, 204(2): 697–718. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv448>
72. Parolai S., Bindi D., Durukal E., Grosser H., Milkereit C. **2007**. Source parameters and seismic moment–magnitude scaling for Northwestern Turkey. *Bull. of the Seismological Society of America*, 97(2): 655–660. <https://doi.org/10.1785/0120060180>
73. Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. **1993**. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien-Shan. *J. of Geophysical Research*, 98(B9): 15779–15795. <https://doi.org/10.1029/93jb01560>
74. Ruff L.J. **1999**. Dynamic stress drop of recent earthquakes: Variations within subduction zones. *Pure and Applied Geophysics*, 154: 409–431. <https://doi.org/10.1007/s000240050237>
75. Safonov D.A., Nagornyykh T.V., Konovalov A.V., Stepanov A.A. **2017**. The moment tensors, focal mechanisms, and stresses on Sakhalin Island. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(3): 225–234. <https://doi.org/10.1134/S0742046317030058>
76. Sander J., Ester M., Kriegel H., Xu X. **1998**. Density-Based clustering in spatial databases: The Algorithm GDBSCAN and its applications. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2): 169–194. doi:10.1023/A:1009745219419
77. Sato T., Hirasawa T. **1973**. Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. of Physics of the Earth*, 21: 415–431. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415>
78. Shaw B.E., Richards-Dinger K., Dieterich J.H. **2015**. Deterministic model of earthquake clustering shows reduced stress drops for nearby aftershocks. *Geophysical Research Letters*, 42: 9231–9238. <https://doi.org/10.1002/2015gl066082>
79. Scholz C.H. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511818516>
80. Scholz C.H. **2019**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rded. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 519 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>
81. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Collettini C. **2016**. Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes. *Nature Geoscience*, 9(9): 695–700. <https://doi.org/10.1038/ngeo2775>
82. Tomic J., Abercrombie R.E., Do Nascimento A.F. **2009**. Source parameters and rupture velocity of small $M \leq 2.1$ reservoir induced earthquakes. *Geophysical J. International*, 179: 1013–1023. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2009.04233.x>

83. Urbancic T.I., Young R.P. **1993**. Space-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with $M < 0$. *Bull. of the Seismological Society of America*, 83: 378–397.
84. Yamada T., Mori J.J., Ide S., Abercrombie R.E., Kawakata H., Nakatani M., Iio Y., Ogasawara H. **2007**. Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine. *J. Geophysical Research*, 112, B03305.
doi:10.1029/2006JB004553