

Тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения

¹@ Борняков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-5119-1092>), bornyak@crust.irk.ru

¹ Добрынина Анна Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-2087-4202>), scisecretary@crust.irk.ru

² Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), pia@icmm.ru

^{1,3} Саньков Владимир Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-1066-2601>), sankov@crust.irk.ru

¹ Салко Денис Владимирович, denis@salko.net

⁴ Встовский Григорий Валентинович, vstovsky@yandex.ru

¹ Мирошниченко Андрей Иванович (<https://orcid.org/0000-0003-2749-8825>), mai@crust.irk.ru

¹ Шагун Артем Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-3906-2650>), shagun@crust.irk.ru

⁵ Синцов Андрей Евгеньевич, asintsov@mail.ru

^{1,3} Каримова Анастасия Алексеевна (<https://orcid.org/0000-0003-3520-1913>), tarasova@crust.irk.ru

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

³ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁴ ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», Москва, Россия

⁵ ВО «Безопасность», Москва, Россия

[Резюме PDF RUS](#)

[PDF ENG](#)

[Полный текст PDF RUS](#)

Резюме. На основе опубликованных и авторских результатов физического моделирования процессов формирования зон разломов выявлены общие закономерности их структурно-динамического развития. Эти закономерности положены в основу авторской тектонофизической модели очага землетрясения, с вытекающим из нее предвестником. В качестве такого предвестника выступает процесс деформационной самоорганизации активных сегментов в очаге готовящегося землетрясения. Показано, что этот процесс поддается превентивной диагностике по данным деформационного и сейсмического мониторинга. Он проявляется в виде низкочастотных автоволновых колебаний непосредственно перед сейсмическим событием во временном интервале от первых дней до первых часов, что позволяет отнести его к краткосрочным.

Ключевые слова:

зона разлома, сегментация, тектонофизическая модель, очаг тектонического землетрясения, самоорганизация, предвестники

Для цитирования: Борняков С.А., Добрынина А.А., Пантелеев И.А., Саньков В.А., Салко Д.В., Встовский Г.В., Мирошниченко А.И., Шагун А.Н., Синцов А.Е., Каримова А.А. Тектонофизическая модель очага тектонического землетрясения. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 313–327. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.313-327>; <https://www.elibrary.ru/xhqjfo>

For citation: Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Panteleev I.A., Sankov V.A., Salko D.V., Vstovsky G.V., Miroshnichenko A.I., Shagun A.N., Sintsov A.E., Karimova A.A. Tectonophysical model of the tectonic earthquake focus. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 313–327. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.313-327>; <https://www.elibrary.ru/xhqjfo>

Список литературы

1. Гамбурцев Г.А. **1955.** Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. *Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР*, 1: 7–14.
2. Певнев А.К. **2015.** Прогноз землетрясений возможен (о месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбурцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и время*, 4 (22): 195–201.
3. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997.** Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616–1619. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
4. Wyss M. et al. **1997.** Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278: 487–488. <https://doi.org/10.1126/science.278.5337.487>

5. Богомолов Л.М., Сычева Н.А. **2022**. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Геосистемы переходных зон*, 6(3): 145–182. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrt>
6. Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. **2019**. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? *Вестн. Московского ун-та. Серия 4, Геология*, 3: 3–12. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
7. Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. **2009**. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
8. Кондепуди Д., Пригожин И. **2002**. *Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур*. М.: Мир, 460 с. (Пер. с англ.).
9. Хакен Г. **1980**. *Синергетика*. М.: Мир, 404 с.
10. Mandelbrot B.B. **1982**. *The fractal geometry nature*. N.Y.: Freeman, 480 p.
11. Шустер Г. **1988**. *Детерминированный хаос. Введение*. М.: Мир, 240 с
12. *Нелинейная геодинамика*. **1994**. Под. ред. Ю.М. Пущаровского. М.: Наука, 192 с.
13. Пущаровский Ю.М. **1998**. Геологическое выражение нелинейных геодинамических процессов. *Геотектоника*, 1: 3–14.
14. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г. Писаренко В.Ф. **1982**. О свойстве дискретности горных пород. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 12: 3–18.
15. Crampin S., Gao Y. **2013**. The new geophysics. *Terra Nova*, 25(3): 173–180. <https://doi.org/10.1111/ter.12030>
16. Kagan Y.Y. **1994**. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process. *Physica D*, 77(4): 160–192.
17. Bak P., Tang C. **1989**. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15635>
18. Ito K., Matsuzaki M. **1990**. Earthquakes as self-organized critical phenomena. *Journal of Geophysical Research*, 95(B5): 6853–6860. <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06853>
19. Olami Z., Feder S., Christensen K. **1992**. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 68(8): 1244–1247. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.68.1244>
20. Sornette D. **2000**. *Critical phenomena in natural sciences. Chaos, fractals, self-organization and disorder: Concepts and tools*. Heidelberg: Springer-Verlag, 423 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04174-1> (Springer Ser. Synerg.).
21. Zöller G., Hainzl S., Kurths J. **2001**. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106: 2167–2176. <https://doi.org/10.1029/2000jb900379>
22. Литовченко И.Н. **2021**. *О типах очагов землетрясений, их модели и формирование*. URL: <http://sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st4977.pdf>
23. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. **2014**. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра*, 3: 44–62.
24. Гольдин С.В. **2005**. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения. *Физическая мезомеханика*, 8(1): 5–14. EDN: [HQTWHN](https://doi.org/10.1029/2005jb900379)
25. Гзовский М.В. **1957**. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности. *Изв. АН СССР. Сер. геофизическая*, 2: 141–160.
26. Горшков Г.П. **1984**. *Региональная сейсмоструктура территории юга СССР (Альпийский пояс)*. М.: Наука, 272 с.
27. Тулиани Л.И. **1999**. *Сейсмичность и сейсмическая опасность: на основе термодинамических и реологических параметров тектоносферы*. М.: Научный мир, 216 с.
28. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110.
29. Шерман С.И. **2014**. *Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция*. Новосибирск: Гео, 359 с.
30. Bath M., Duda S.J. **1964**. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities. *Annals of Geophysics*, 17(3): 353–368. <https://doi.org/10.4401/ag-5213>
31. Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. **2003**. Флуктуация геофизических полей и прогноз землетрясений. *Физика Земли*, 4: 3–20.
32. Кочарян Г.Г. **2010**. Разломная зона как нелинейная механическая система. *Физическая мезомеханика*, 13 (Спец. вып.): 5–17. EDN: NQXHNW
33. Кузнецов О.Л. **1981**. Нелинейная геофизика. В кн.: *Вопросы нелинейной геофизики*. М.: ВНИИЯГГ, с. 3–14.
34. Кузнецов О.Л. (ред.). **1981**. *Вопросы нелинейной геофизики*. М.: ВНИИЯГГ, 187 с.
35. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. **2011**. Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел. *Вычислительная механика сплошных сред*, 4(1): 90–100.
36. Родкин М.В. **2011**. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных подсистем. *Физика Земли*, 11: 18–26. EDN: [OJGOOR](https://doi.org/10.1029/2011jb008763)
37. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 269 с.
38. Тюпкин Ю.С. **2004**. Формирование потенциального очага землетрясения: аналогия с фазовым переходом. *Вычислительная сейсмология*, 35: 296–311.
39. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
40. Goebel T.H.W., Becker T.W., Schorlemmer D., Stanchits S., Sammis C., Rybacki E., Dresen G. **2012**. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics. *Journal of Geophysical Research*, 117(B03310). <https://doi.org/10.1029/2011JB008763>
41. Goebel T.H.W., Candela T., Sammis C.G., Becker T.W., Dresen G., Schorlemmer D. **2014**. Seismic event distributions and off-fault damage during frictional sliding of saw-cut surfaces with pre-defined roughness. *Geophysical Journal International*, 196: 612–625. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt401>
42. Jin M.J., Sherman S.I., Guo Y.S. **2012**. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. *Science China Earth Sciences*, 55: 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4423-2>

43. Дзинь М., Яншуань Г., Шерман С.И. **2014**. Ускоренный синергизм вдоль разлома: возможный индикатор неизбежного крупного землетрясения. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2): 387–399. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0134>
44. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. **2014**. Основные закономерности разломообразования и их прикладные следствия: по результатам физического моделирования. *Геодинамика и тектонофизика*, 4: 823–861.
45. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. **2018**. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 653–670. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0366>
46. Каримова А.А., Борняков С.А. **2020**. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования). *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*, 33: 44–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>
47. Sutton M.A., Ortu J.J., Schreier H.W. **2009**. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer, 316 p.
48. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. **1983**. *Области динамического влияния разломов (результаты моделирования)*. Новосибирск: Наука, 112 с.
49. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А и др. **1991**. *Разломообразование в литосфере: зоны сдвига*. Новосибирск: Наука, 261 с.
50. Семинский К.Ж. **2003**. *Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект*. Новосибирск: ГЕО, 244 с.
51. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминистского подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110. <https://disk.yandex.ru/d/SMrTgPXpqS744Q>
52. Ребецкий Ю.Л. **2007**. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофизический журнал*, 29(6): 92–110.
53. Борняков С.А. **1990**. Количественный анализ параметров разномасштабных сдвигов. *Геология и геофизика*, 10: 34–42.
54. Борняков С.А., Встовский Г.В. **2010**. Первый опыт сейсмодеоформационного мониторинга Байкальской рифтовой зоны (на примере Южно-Байкальского землетрясения 27 августа 2008 г.). *Доклады РАН*, 431(4): 537–541. EDN: [LOKDND](https://doi.org/10.31857/S2686739721050042)
55. Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е., Салко Д.В. **2022**. Новый подход к прогнозу сильных землетрясений в Южном Прибайкалье на основе данных мониторинга деформаций горных пород: методология и результаты. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(2): 0588. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0588>
56. Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. **2021**. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в метанестабильное состояние. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 498(1): 86–90. <https://doi.org/10.31857/S2686739721050042>
57. Борняков С.А., Добрынина А.А., Шагун А.Н., Саньков В.А., Салко Д.В., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е. **2023**. О подобии деформационных процессов перед ледовыми ударами и тектоническими землетрясениями. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 509(2): 243–249. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602903>
58. Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В. **2023**. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w = 5.6$ в Байкальской впадине. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 509(1): 74–80. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602733>
59. Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Kim M. **2024**. Application of machine learning methods to the problem of identifying earthquake precursors in the Baikal Region. In: *Marchuk Scientific Readings: Theses of the International Conference, October 7–11, 2024*. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, p. 121.