

Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1

В. А. Мубассарова^{*1}

Л. М. Богомолов²

А. С. Закупин²

И. А. Пантелеев³

¹ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

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

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

На основе литературных источников представлен обзор современного состояния проблемы влияния электромагнитного поля на процессы деформирования в образцах горных пород и искусственных материалов. Не вызывает сомнений определенное сходство особенностей процессов разрушения, обнаруженных при лабораторных исследованиях поведения различных материалов под нагрузкой, и явлений, наблюдаемых в сейсмически активных регионах. Опираясь на это сходство, можно с определенными допущениями говорить о вкладе того или иного механизма в триггерное воздействие электромагнитных полей на вариации сейсмической активности. Однако адекватной и применимой на практике количественной модели, описывающей наблюдаемые эффекты, пока не существует.

Ключевые слова

триггерное воздействие, электромагнитное поле, акустическая эмиссия, деформация, деформация горных пород

Для цитирования: Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А. Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 2. С. 155–174. doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.2.155-174

For citation: Mubassarova V.A., Bogomolov L.B., Zakupin A.S., Panteleev I.A. Acoustic emission and strain responses of rocks triggered by electromagnetic action. – A review. Part 1. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, N 2, p. 155–174. (In Russ.). doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.2.155-174

Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 77–80. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. Estimation of the triggering effect energy in relation to model sample failure. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2008, 44(1): 69-72. <https://doi.org/10.1134/s1069351308010096>]
2. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергвоздействии // *Физика Земли*. 2006. № 10. С. 36–42. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N. On the structure of acoustic emission of model samples in response to an external energy action. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(10): 824-829. <https://doi.org/10.1134/s1069351306100065>]
3. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Окунев В.И. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 64–70. [Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Okunev V.I. Dynamics of energy exchange in model samples subjected to elastic and electromagnetic impacts. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 919-925. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100016>]
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // *Физика твердого тела*. 1987. Т. 29, № 2. С. 467–470.

5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Микропластичность диамагнитных кристаллов в постоянном магнитном поле // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1990. № 10. С. 85–88.
6. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Михина Е.Ю., Петржик Е.А. О природе влияния электрического тока на магностимулированную микропластичность монокристаллов Al // *Письма в ЖЭТФ*. 1998. Т. 67, вып. 10. С. 788–793.
7. Альшиц В.И., Урусовская А.А., Смирнов А.Е., Беккауер Н.Н. Деформация кристаллов LiF в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42, вып. 2. С. 270–272. [Al'shits V.I., Urusovskaya A.A., Smirnov A.E., Bekkauer N.N. Deformation of LiF crystals in DC magnetic field. *Physics of the Solid State*, 2000, 42(2): 277-279. <https://doi.org/10.1134/1.1131197>].
8. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Котовский Р.К., Петржик Е.А., Трончик П. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно // *Успехи физических наук*. 2017. Т. 187, № 3. С. 327–341. [Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A., Kotowski R.K., Tronczyk P. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: A look through a magnetic window. *Physics-Uspokhi*, 2017, 60(3): 305-318. <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.07.037869>].
9. Богомоллов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов = [Bogomolov L.M. Electromagnetic effect on microcrack kinetics and electro-induced variations in acoustic emission of rocks] // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13, № 3. С. 39–56.
10. Богомоллов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. *Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности*. Саарбрюкен: Lambert Acad. Publ., 2011. 408 с.
11. Богомоллов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного напряженно-деформированного состояния // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 7. С. 20–27.
12. Бучаченко А.Л. О влиянии магнитного поля на механику немагнитных кристаллов: происхождение магнитопластического эффекта // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2006. Т. 129, вып. 5. С. 909–913. [Buchachenko A.L. Effect of magnetic field on mechanics of nonmagnetic crystals: The nature of magnetoplasticity. *J. of Experimental and Theoretical Physics*, 2006, 102(5): 795-798. <https://doi.org/10.1134/s1063776106050116>].
13. Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184, № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0184.201401e.0101> [Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics-Uspokhi*, 2014, 57(1): 92-98. <https://doi.org/10.3367/ufne.0184.201401e.0101>].
14. Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясения // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189, № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.3367/ufnr.2018.03.038301> [Buchachenko A.L. Microwave stimulation of dislocations and the magnetic control of earthquakes core. *Physics-Uspokhi*, 2019, 62(3): 46–53. <https://doi.org/10.3367/ufne.2018.03.038301>].
15. Веттегрень В.И., Куksenко В.С., Крючков М.А. Динамика и иерархия землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 40–45. [Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Kryuchkov M.A. Dynamics and hierarchy of earthquakes. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(9): 755-760. <https://doi.org/10.1134/s1069351306090059>].
16. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А. Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17, № 2. С. 32–53.
17. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 89–103. [Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V. The physical basis of the effects caused by electromagnetic forcing in the intensity of geoaoustic processes. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50(1): 87-101. <https://doi.org/10.1134/s1069351314010042>].
18. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, вып. 5. С. 769–803.
19. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость макропластического течения ионных кристаллов // *Письма в ЖЭТФ*. 1995. Т. 61, вып. 7. С. 583–586.
20. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // *Физика земли*. 2004. № 10. С. 37–54.
21. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. *Триггерные механизмы землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010, Москва, ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 52–61.*
22. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Выявление пространственной области будущего очага разрушения на основе анализа энергетических распределений сигналов акустической эмиссии

- // *Физика Земли*. 2015. № 3. С. 78–84. [Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G. Locating the spatial region of a future fracture nucleation based on analyzing energy distributions of acoustic emission signals. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2015, 51(3): 392-398. <https://doi.org/10.1134/s1069351315030027>]
23. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Коновалов С.В., Филиппев Р.А., Семухин Б.С. О влиянии электрического потенциала на сопротивление микроиндентированию поверхности металлов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2010. № 2. С. 85–89.
 24. Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47, вып. 6. С. 1000–1008.
 25. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомоллов Л.М., Боровский Б.В., Ильичев П.В., Сычев В.Н., Сычева Н.А. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия = [Zakupin A.S., Aladiev A.V., Bogomolov L.M., Borovskii B.V., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Sycheva N.A. Relationship of electric polarization and acoustic emission from specimens of geomaterials under uniaxial compression] // *Вулканология и сейсмология*. 2006а. № 6. С. 22–33.
 26. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомоллов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // *Физика Земли*. 2006б. № 10. С. 43–50. [Zakupin A.S., Avagimov A.A., Bogomolov L.M. Responses of acoustic emission in geomaterials to the action of electric pulses under various values of the compressive load. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2006, 42(10): 830-837. <https://doi.org/10.1134/s1069351306100077>]
 27. Зуев Л.Б., Данилов В.И. *Физические основы прочности материалов*: учеб. пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2013. 376 с.
 28. Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов* / отв. ред. акад. РАН В.В. Адушкин. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
 29. Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Ч. 1. Лабораторные эксперименты // *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18, № 4. С. 94–104. [Kocharyan G.G., Novikov V.A. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Pt 1. Laboratory experiments. *Physical Mesomechanics*, 2015, 19(2): 189-199. <https://doi.org/10.1134/s1029959916020120>]
 30. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Режим деформирования разломных зон и инициирующий потенциал сейсмических колебаний // *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010, Москва, ИДГ РАН*. М.: ГЕОС, 2013. С. 34–45.
 31. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Влияние механического поля на поляризацию природных диэлектриков (горных пород) // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30, вып. 14. С. 82–88. [Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F. Effect of mechanical stress on the polarization of natural dielectrics (Rocks). *Technical Physics Letters*, 2004, 30(7): 612-614. <https://doi.org/10.1134/1.1783419>]
 32. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках // *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39, № 7. С. 1202–1204.
 33. Куксенко В.С., Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 25–31. [Kuksenko V.S., Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G. Fracture of granite under various strain conditions. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 879–885. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100053>]
 34. Лапшин В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Строганова С.М. Инициация акустической эмиссии в обводненных образцах песчаника // *Докл. АН*. 2016. Т. 469, № 1. С. 97–101. [Lapshin V.B., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Potanina M.G., Smirnov V.B., Stroganova S.M. Initiation of acoustic emission in fluid-saturated sandstone samples. *Dokl. Earth Sciences*, 2016, 469(1): 705-709. <https://doi.org/10.1134/s1028334x16070047>]
 35. Моргунов Р.Б., Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и магнитная память в диамагнитных твердых телах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2009. Т. 136, N 3. С. 505–515. [Morgunov R.B., Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and magnetic memory in diamagnetic solids. *J. of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, 109(3): 434–443. <https://doi.org/10.1134/s1063776109090076>]
 36. Мубассарова В.А. *Влияние электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах горных пород*: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2018. 24 с.
 37. *Нелинейная механика геоматериалов и геосред* / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, П.В. Кузнецов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов; отв. ред. Л.Б. Зуев. Новосибирск: Гео, 2007. 235 с.
 38. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // *Вестник Пермского НЦ*. 2014. № 3. С. 44–62.

39. Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Дамаскинская Е.Е., Богомолов Л.М., Наймарк О.Б. Влияние слабого электрического поля на пространственно-временную динамику акустической эмиссии при одноосном сжатии гранита // *Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы третьего Всерос. семинара-совещ.* / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2015. С. 244–252.
40. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // *Физика Земли*. 2012. № 7–8. С. 63–88. [Smirnov V.B., Zavyalov A.D. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2012, 48(7): 615–639. <https://doi.org/10.1134/s1069351312070075>]
41. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 26–36.
42. Смирнов Б.И., Песчанская Н.Н., Николаев В.И. Магнитоэлектрический эффект в сегнетоэлектрических кристаллах NaNO_2 // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, № 12. С. 2154–2156.
43. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования // *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 17–49. [Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2010, 46(2): 104–135. <https://doi.org/10.1134/s1069351310020023>]
44. Соболев Г.А. *Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии*. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
45. Соболев Г.А. *Сейсмический шум*. М.: Наука и образование, 2014. 272 с.
46. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 2003. 270 с.
47. Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций // *Докл. АН*. 2010. Т. 433, № 5. С. 689–692.
48. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // *Физика Земли*. 2011. № 10. С. 82–96. [Tarasov N.T., Tarasova N.V. Influence of electromagnetic fields on the seismotectonic strain rate; relaxation and active monitoring of elastic stresses. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2011, 47(10): 937–950. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100120>]
49. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Активизация сейсмичности в области активного разлома под действием электромагнитных полей и взрывов // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. Четвертой тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016, Москва*. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 571–577.
50. Тарасов Н.Т., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42, № 10. С. 1641–1649.
51. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // *Успехи физических наук*. 1968. Т. 96, № 1. С. 38–60.
52. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Беккауэр Н.Н., Смирнов А.Е. Деформация кристаллов NaCl в условиях совместного действия магнитного и электрического полей // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42, № 2. С. 267–269.
53. Aaronson H.I., Sanday S.C. *Effects of high intensity electrical, magnetic, ultrasonic and microwave fields upon the microstructure, processing and properties of metal and ceramic alloys*: Report Naval Res. Lab. Washington DC, 1995. NRL/MR/6303-95-7791.
54. Arakawa M., Petrenko V.F., Chen Ch. Effect of direct and alternating-current electric fields on friction between ice and metal // *Canadian J. of Physics*. 2003. Vol. 81. P. 209–216. <https://doi.org/10.1139/p03-020>
55. Beridze E., Gennari C., Michieletto F., Forzan M. Electroplastic effect // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 698. P. 264–272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.264>
56. Bogomolov L., Zakupin A. Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? // *Solid State Phenomena*. 2008. Vol. 137. P. 199–208. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.137.199>
57. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 47, N 1. P. 65–72.
58. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153, N 3739. P. 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
59. Chelidze T., Varamashvili N., Devidze M., Tchelidze Z., Chikhladze V., Matcharashvili T. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip // *Annals of Geophysics*. 2002. Vol. 45, N 5. P. 587–598.

60. Chelidze T., Gvelesiani A., Varamashvili N., Davidze M., Chikhradze V., Tchelidze Z., Elashvili M. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model // *Acta Geofizika Polonica*. 2004. Vol. 52, N 1. P. 49–62.
61. Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili T., Tosi P. Do influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquakes time distribution in the Bishkek Test Area (Central Asia) // *Annals of Geophysics*. 2006. Vol. 49, N 4/5. P. 961–975.
62. Chelidze T., Matcharashvili T., Mepharidze E., Tephnadze D., Zhukova N. Preliminary results of forced stick-slip synchronization area studies: experiments and theoretical models // *J. of the Georgian Geophysical Society*. 2016. Vol. 19(A). P. 35–48.
63. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering A*. 2000. Vol. 287, N 2. P. 276–287. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00786-3)
64. Conrad H. Thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field or current // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 322, N 1–2. P. 100–107. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(01\)01122-4](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01122-4)
65. Gabriellov A.M., Keilis-Borok V.I. Patterns of stress corrosion: Geometry of the principal stresses // *Pure and Applied Geophysics*. 1983. Vol. 121, N 3. P. 477–494. <https://doi.org/10.1007/bf02590152>
66. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinkin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks // *Russ. J. of Earth Sciences*. 2013. Vol. 13, ES1002. P. 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013ES000527>
67. Hardy H.R.Jr. *Acoustic Emission / Microseismic Activity*: Vol. 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications. London: CRC Press, 2005. 300 p. <https://doi.org/10.1201/9780203971109>
68. Keilis-Borok V.I. The lithosphere of the Earth as nonlinear system with implications for earthquake prediction // *Reviews of Geophysics*. 1990. Vol. 28, N 1. P. 5–34. <https://doi.org/10.1029/rg028i001p00019>
69. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks // *Pure and Applied Geophysics*. 1996. Vol. 146, N 2. P. 253–263. <https://doi.org/10.1007/bf00876492>
70. Lockner D., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // *Nature*. 1991. Vol. 350, N 6313. P. 39–42. <https://doi.org/10.1038/350039a0>
71. McLaskey G.C., Kilgore B.D., Lockner D.A., Beeler N.M. Laboratory generated M-6 earthquakes // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171, N 10. P. 2601–2615. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0772-9>
72. Molotskii M. Theoretical basis for electro- and magnetoplasticity // *Materials Science and Engineering A*. 2000. Vol. 287(2). P. 248–258. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)00782-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00782-6)
73. Molotskii M., Fleurov V. Spin effects in plasticity // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 78, N 14. C. 2779–2782. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.78.2779>
74. Molotskii M., Fleurov V. Dislocation paths in a magnetic field // *The J. of Physical Chemistry B*. 2000. Vol. 104, N 16. P. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
75. Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naimark O.B. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, N 4. P. 919–938. <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0163>
76. Mugele F., Klingner A., Buchrle J., Steinhauser D., Herminghaus S. Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns // *J. of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17. P. 5559–5576. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/9/016>
77. Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N., Liu J., Ruzhin Ya.Yu., Shen X. Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models // *Earthquake Science*. 2017. Vol. 30, N 4. P. 167–172. <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0181-8>
78. Panteleev I.A., Gavrilov V.A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoaoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study // *Russ. J. of Earth Sciences*. 2015. Vol. 15, ES4003. P. 1–14. <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>
79. Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B. Nonlinear dynamics of the blow-up structures in the ensembles of defects as a mechanism of formation of earthquake sources // *Izv. Physics of the Solid Earth*. 2012. Vol. 48, N 6. P. 504–515. doi:10.1134/S1069351312060055
80. Petrenko V.F. The effect of static electric fields on ice friction // *J. of Applied Physics*. 1994. Vol. 76, N 2. P. 1216–1219. <https://doi.org/10.1063/1.357850>
81. Petrenko V.F. *Study of the physical mechanisms of ice adhesion*. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 2003. 37 p.
82. Ponomarev A., Sobolev G., Koltsov A. Acoustic emission under electric excitation // *ESC XXVIII General Assembly, Genova: Book of Abstracts*. 2002. P. 238.
83. Scholz C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // *Bull. of the Seismological Society of America*. 1968. Vol. 58, N 1. P. 399–415.

84. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. Vol. 391, N 6662. P. 37–42.
<https://doi.org/10.1038/34097>
85. Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. Initiating acoustic emission with electric action // *Proc. 27-th ESC General Assembly*. Lisbon, Portugal, 2000.
86. Sornette D., Sammis C.G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions // *J. de Physique I*. 1995. Vol. 5(5). P. 607–619.
<https://doi.org/10.1051/jp1:1995154>
87. Tarasov N.T., Tarasova N.V. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses // *Annals of Geophysics*. 2004. Vol. 47, N 1. P. 199–212.
88. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. Vol. 30. P. 521–605.
89. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A. The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens // *Materials Science and Engineering A*. 2009. Vol. 521–522. P. 401–404.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.112>
90. Zakupin A., Bogomolov L., Mubassarova V., Kachesova G., Borovsky B. Acoustic emission and electromagnetic effects in loaded rocks // *Acoustic Emission* / Ed. W. Sikorski. Croatia, Rijeka: InTech, 2012a. Ch. 8. P. 173–198. <https://doi.org/10.5772/31411>
91. Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Borovsky B.V., Kachesova G.S. Electromagnetic effects in loaded marble // *Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, 26–31 August 2012, Kazan, Russia*. Kazan: Esis, 2012b. P. 107–114.
92. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Principles of the kinetic approach of fracture prediction // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1984. Vol. 1, N 3. P. 271–274.
[https://doi.org/10.1016/0167-8442\(84\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0167-8442(84)90007-7)