



## **ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

### **ЭВОЛЮЦИЯ СИГНАЛОВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ АРГИЛЛИТА С ОТВЕРСТИЕМ В ЦЕНТРЕ**

**В. И. Востриков, О. М. Усольцева, П. А. Цой**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: usoltseva57@mail.ru,  
Красный проспект, 54, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты испытаний на одноосное сжатие до разрушения призматических образцов из аргиллита с отверстием в центре с использованием измерительного комплекса, предназначенного для синхронной регистрации напряжений, деформаций, температурного поля и параметров микросейсмической эмиссии. Проведен анализ изменения этих физических параметров на различных стадиях деформирования образца. Показано, что эволюция деформационного процесса — появление микроповреждений, их локализация в области будущего разрушения и возникновение магистральной трещины, приводят к существенному изменению спектрального состава сигналов микросейсмической эмиссии и температурного поля. Повышение температуры в области будущего основного разрыва и генерация мощных низкочастотных гармоник при нагрузках, приближающихся к пику, может служить предвестником разрыва на поверхности и, как следствие, разрушения геоматериала.

*Лабораторный эксперимент, напряжение, деформация, микросейсмическая эмиссия, температурное поле*

### **EVOLUTION OF MICROSEISMIC EMISSION SIGNALS AND TEMPERATURE FIELD DURING COMPRESSION OF PRISMATIC MUDSTONE SAMPLES WITH A HOLE IN THE CENTER**

**V. I. Vostrikov, O. M. Usol'tseva, and P. A. Tsoi**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: usoltseva57@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

This paper presents the results of testing prismatic samples made of mudstone with a hole in the center under uniaxial compression before destruction using the test-measurement complex designed for synchronous recording of stresses, strains, temperature field and microseismic emission parameters. The changes in these physical parameters have been analyzed at different stages of sample deformation. Evolution of the deformation process — the appearance of micro-damages, their localization in the area of future destruction and the appearance of a main crack — leads to a significant change in the spectral composition of microseismic emission signals, micro-deformation field and the temperature field. A temperature increase in the region of the future main discontinuity and generation of powerful low-frequency harmonics under loads approaching the peak can be a forerunner of discontinuity on the surface and, as a consequence, of geomaterial destruction.

*Laboratory experiment, stress, strain, microseismic emission, temperature field*

Разрушение массива горных пород сопровождается такими физическими процессами, как увеличение деформаций, генерации сигналов микросейсмической эмиссии (МСЭ), изменение температуры и т. д. В научной литературе имеется ряд работ, посвященных исследованиям

изменения температуры различных горных пород при их нагружении [1–7], в которых была обнаружена взаимосвязь между изменением температуры и изменением напряжений, а также исследованиям мониторинга сейсмических сигналов, возникающих при нагружении горной породы и их изменению в процессе деформирования [8–14]. Данная работа посвящена комплексному исследованию пространственно-временной взаимосвязи деформаций, температурного поля и параметров сигналов микросейсмической эмиссии на различных стадиях процесса деформирования образцов аргиллита в форме призм с отверстием в центре на основе анализа экспериментальных данных при одноосном сжатии до разрушения.

Выполнена серия из пяти экспериментов на образцах из аргиллита в виде прямоугольных призм размерами 50×50×20 мм с диаметром отверстия 15 мм в центре (рис. 1). Испытания образцов проводились при одноосном жестком сжатии до разрушения со скоростью 0.1–6 мм/мин на сервогидравлическом испытательном прессе Instron-8802. Для регистрации сигналов микросейсмической эмиссии использовалось 4 микросейсмических датчика KD 91. Измерение температурного поля осуществлялось с помощью компьютерного тепловизора TKVr-SVIT 101, точность измерения составляла 0.1°.

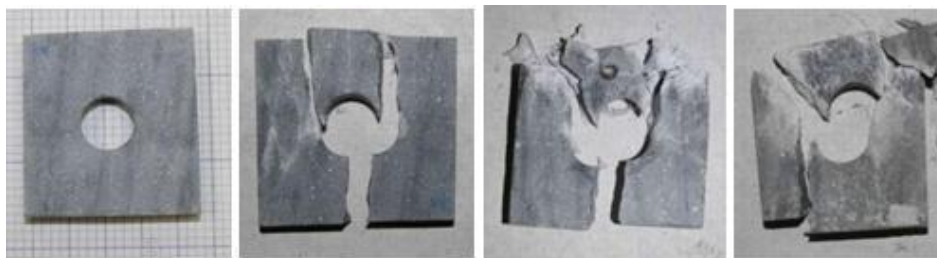


Рис. 1. Образцы аргиллита до и после испытания

На рис. 2 показан общий вид экспериментального комплекса.

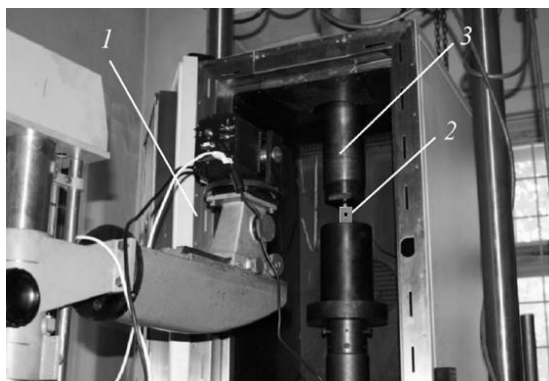


Рис. 2. Общий вид экспериментального комплекса: 1 — видеокамера; 2 — образец горной породы; 3 — захват пресса Instron-8802

На рис. 3 представлены зависимости “напряжение – деформация” и “напряжение – время”.

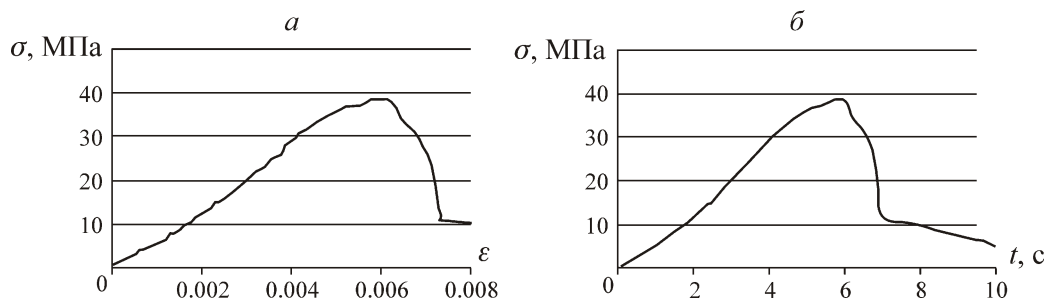


Рис. 3. Зависимости “напряжение – деформация” (а) и “напряжение – время” (б) образца аргиллита при сжатии

Анализ большого количества микросейсмических сигналов, зарегистрированных при одноосном сжатии до разрушения призматических образцов аргиллита, подтвердил ранее установленные закономерности изменения характеристик сигналов МСЭ в соответствии со стадией нагружения образцов. На рис. 4 показана диаграмма “ $\sigma/\sigma_{\max} - t/t_{\max}$ ”, полученная из данных одноосного сжатия, где  $\sigma/\sigma_{\max}$  — отношение величины текущего напряжения к пределу прочности  $\sigma_{\max}$ ;  $t/t_{\max}$  — отношение текущего времени эксперимента  $t$  к значению  $t_{\max}$ , соответствующему  $\sigma = \sigma_{\max}$ .

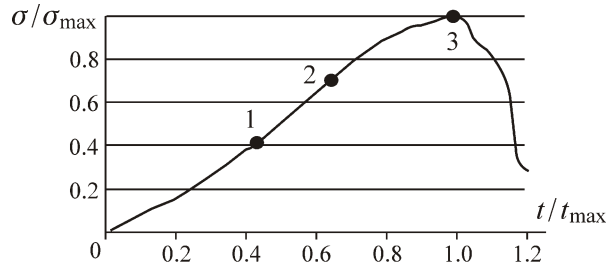


Рис. 4. Зависимость “ $\sigma/\sigma_{\max} - t/t_{\max}$ ” образца аргиллита при сжатии

Типичные сигналы, записанные в точках 1, 2, 3 (рис. 4), показаны на рис. 5.

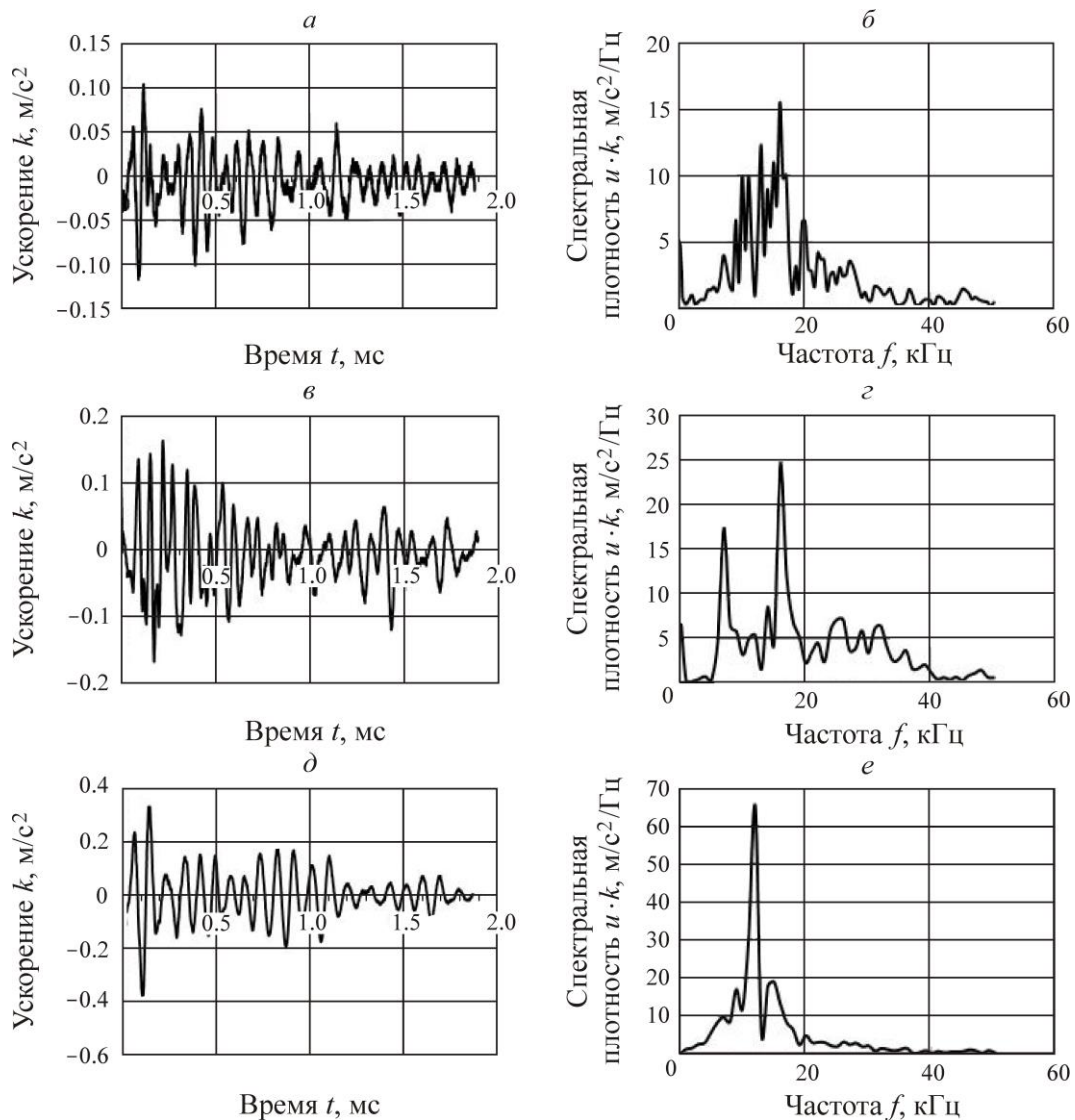


Рис. 5. Характеристики сигналов МСЭ образца аргиллита при сжатии: ускорение (*a, в, д*) и спектральная плотность (*б, з, е*) для трех стадий нагружения диаграммы рис. 4

Выявлены следующие закономерности сигналов МСЭ:

— при уровнях напряжений  $\sigma/\sigma_{\max} = 0.3-0.4$  (точка 1) регистрируются первые сигналы МСЭ, величина ускорения  $0.2-0.3 \text{ м/с}^2$ , диапазон частот  $6-25 \text{ кГц}$  (рис. 5а, б);

— при  $\sigma/\sigma_{\max} = 0.5-0.8$  (точка 2) амплитуда сигнала МСЭ увеличивается и его величина достигает значения  $0.35-0.4 \text{ м/с}^2$ . В то же время частотный спектр несколько сужается и смещается в сторону низких частот  $f = 12-18 \text{ кГц}$  (рис. 5в, з);

— на последней стадии деформации при напряжении, близком к  $\sigma/\sigma_{\max} = 0.8-1.0$  (точка 3), число сигналов МСЭ значительно возрастает, их энергия увеличивается, спектр частот дополнительно сужается и смещается к низким частотам до  $f = 8-12 \text{ кГц}$ . Мощный низкочастотный сигнал  $12 \text{ кГц}$  генерируется во время инициирования основного разрыва (рис. 5д, е);

Анализ температурных данных показывает, что на начальном этапе нагружения температурное поле на поверхности образца не имеет заметных изменений. По мере увеличения нагрузки оно становится неоднородным и при значениях, соответствующих моменту времени  $t/t_{\max} = 0.8-0.9$  температура увеличивается в области с X-образной формой вокруг отверстия (рис. 6а–е). Видимо, это соответствует областям локализации максимальных микродеформаций, превышающих среднее значение по поверхности [15, 16], что связано с неоднородностью горной породы, а также с характером распределения напряжений вокруг отверстия при его сжатии.

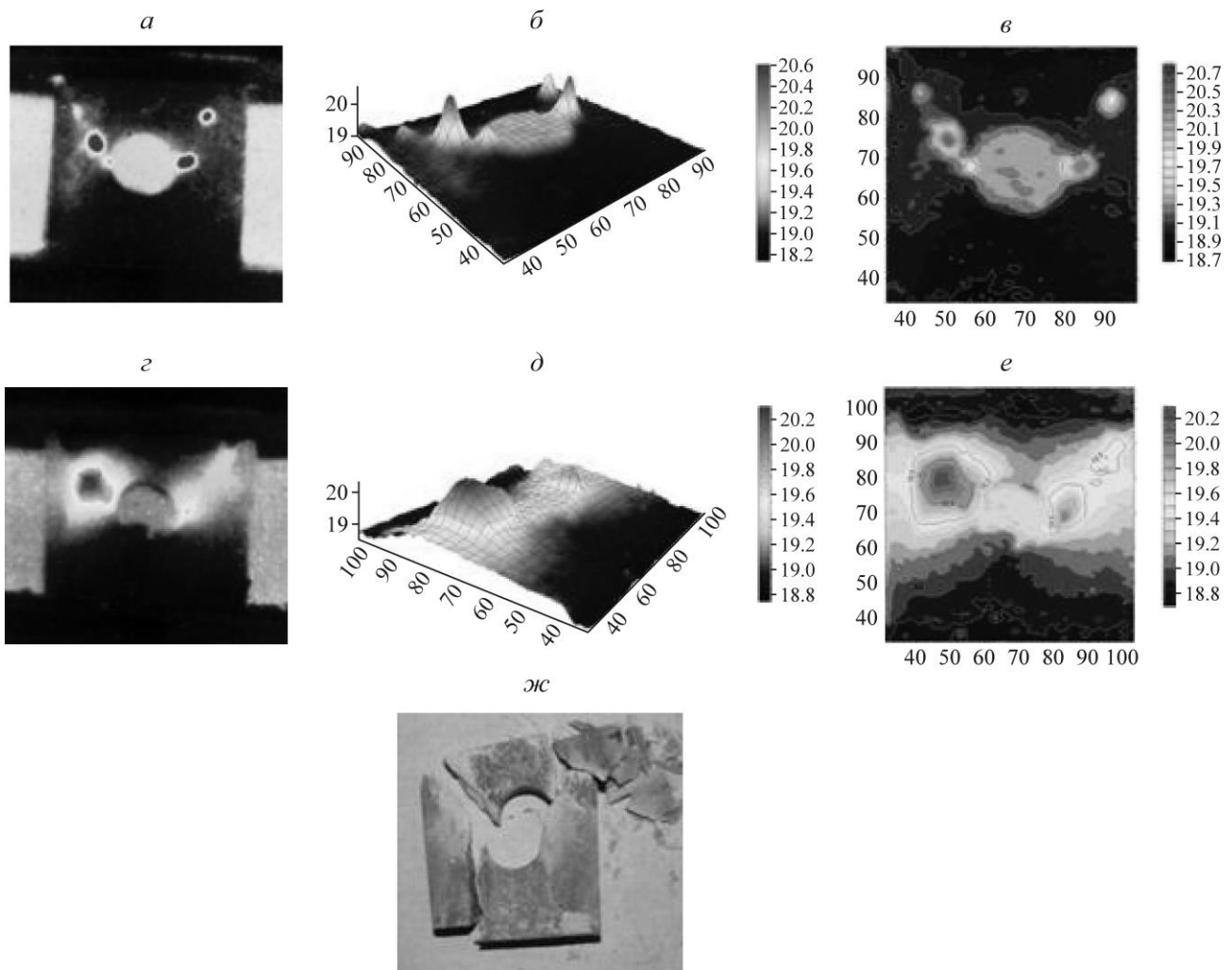


Рис. 6. Температурное поле поверхности образца аргиллита в моменты нагружения:  $t = 0.8t_{\max}$  (а, б, в) и  $t = 0.9t_{\max}$  (з, д, е); фотография разрушенного образца (ж)

При дальнейшем увеличении нагрузки температурное поле слева от отверстия увеличивается в размере и именно здесь в верхнем левом углу над отверстием появляется первая трещина, затем возникает вторая сверху справа над отверстием и в последний момент вертикальная трещина снизу под отверстием приводит к полному разрушению образца. Максимальная разница между самой высокой и самой низкой температурой на поверхности образца составляет 1.5°. С увеличением скорости нагружения от 0.1 до 6 мм/мин отмеченные закономерности изменения температурного поля проявляются более контрастно.

## ВЫВОДЫ

На основе серии экспериментов при одноосном сжатии призматических образцов из аргиллита с отверстием в центре проведен комплексный анализ эволюции сигналов микросейсмической эмиссии, температурного поля на различных стадиях нагружения. Анализ показал, что области концентрации деформаций соответствует повышение температуры, а также возникновение сигналов микросейсмической эмиссии. Эволюция процесса деформации, развитие микроразрушений и образование магистрального разрыва приводят к существенному изменению температурного поля и спектрального состава микросейсмических эмиссионных сигналов. В области будущего основного разрыва при нагрузках, приближающихся к пиковым, происходит локализация микроразрушений, температура возрастает, генерируются мощные низкочастотные сигналы микросейсмической эмиссии, что может служить предвестником разрыва и разрушения породного массива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Geng N. G., Cui C. Y., and Deng M. D.** Remote sensing detection of rock fracturing experiment and the beginning of remote rock mechanics, *ActaGeoscientiaSinica*, 2002, vol. 14, pp. 645 – 652.
2. **Wu L. X. and Liu S. J.** Changes in IR with rock deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39, no. 6, pp. 825 – 831.
3. **Ma J., Ma S. P., Liu P. X., et al.** Thermal field indicators for identifying active fault and its instability from laboratory experiments, *Seismology and Geology*, 2008, vol. 30, no. 2, pp. 364 – 381.
4. **Ma J., Liu L. Q., Liu P. X., et al.** Thermal precursory pattern of fault unstable sliding — An experimental study of EN echelon faults, *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, vol. 50, no. 4, pp. 1141 – 1149.
5. **Jin M., Shaopeng M., Liqiang L., and Peixun L.** Experimental study of thermal and strain fields during deformation of en echelon faults and its geological implications, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 24 – 35. [Цзинь М., Шаопхен М., Лицзянь Л., Пхейксан Л. Экспериментальное изучение тепловых и деформационных полей в процессе разрушения эшелонированных разломов и изменения геологических условий // Геодинамика и тектонофизика. — 2010. — Т. 1. — № 2. — С. 24 – 35.] <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0004>
6. **Liu P. X., Liu L. Q., Chen S. Y., et al.** An experiment on the infrared radiation of sruficial rocks during deformation, *Seismology and Geology*, 2004, vol. 26, no. 3, pp. 502 – 511.
7. **Liu S. J., Wu L. X., Wu Y. H., et al.** Analysis of affecting factors and mechanics of infrared radiation coming from loaded rocks, *Mine Surveying*, 2003, no. 3, pp. 67 – 68.
8. **Reza Nejati H. and Ghazvinian A.** Brittleness effect on rock fatigue damage evolution, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, vol. 47, issue 5, pp. 1839 – 1848.
9. **Kim J.-S., Lee K.-S., Cho W.-J., Choi H.-J., and Cho G.-C.** A Comparative evaluation of stress–strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 48, issue 2, pp. 495 – 508.

10. **Shkuratnik V. L., Novikov E. A., and Oshkin R. O.** Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 249–255. [Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Ошкин Р. О. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 69–76.]
11. **Wanga E., Jia H., Song D., Li N., and Qian W.** Use of ultra-low-frequency electromagnetic emission to monitor stress and failure in coal mines, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, vol. 70, pp. 16–25.
12. **Kurlenya M. V., Serdyukov A. S., Duchkov A. A. and Serdyukov S. V.** Wave tomography of methane pockets in coal bed, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 617–622. [Курленя М. В., Сердюков А. С., Дучков А. А., Сердюков С. В. Волновая томография очагов аккумуляции метана в угольном пласте // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 3–9.]
13. **Serdyukov S. V., Azarov A. V., Dergach P. A. and Duchkov A. A.** Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 634–640. [Сердюков С. В., Азаров А. В., Дергач П. А., Дучков А. А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 192–200.]
14. **Vostrikov V. I., Usoltseva O. M., Tsoy P. A., and Semenov V. N.** Deformation processes features and microseismic emission of rock specimens under loading until failure, *Interexpo Geosibir*, 2016, vol. 5, pp. 46–50. [Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Особенности развития процессов деформирования и микросейсмической эмиссии при нагружении образцов горных пород до разрушения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. — Новосибирск, 2016. — Т. 3. — С. 46–50.]
15. **Zuev L. B., Danilov V. I., and Barannikova S. A.** Physics of macrolocalization of plastic flow, *Novosibirsk, Nauka*, 2008, 327 pp. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Баранникова С. А. Физика макролокализации пластического течения. — Новосибирск: Наука, 2008. — 327 с.]
16. **Usoltseva O. M., Vostrikov V. I., Tsoy P. A., and Semenov V. N.** Integrated studies into characteristics of physical fields using discontinuous geomedium models under external loading, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 134, Metrology, standardization, quality: theory and practice (MSQ-2017), Omsk, 2018, Art. 012068, pp. 1–5.